

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Особенности формирования изотопно-модифицированных частиц в плазме в условиях постоянного магнитного поля</b>

УДК 621.039.3:533.9:537.811

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Миклашевич Леонид Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Мышкин В.Ф.	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
Бычков П.Н.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Миклашевич Леонид Андреевич

Тема работы:

Особенности формирования изотопно-модифицированных частиц в плазме в условиях магнитного поля	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№957/с от 16.02.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2019 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Керамическая подложка из оксида алюминия;</li> <li>2. Температура кипения <math>Al_2O_3</math> – 3530К;</li> <li>3. Содержание изотопов: <math>^{16}O</math> (99,759%); <math>^{18}O</math> (0,204%);</li> <li>4. Магнитное поле 1,1 Тл;</li> <li>5. Источник плазмы: лазерный пробой.</li> </ol>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оптимизация параметров лазерных импульсов, обеспечивающих равномерное испарение порошка;</li> <li>2. Оптимизация величины магнитного поля, обеспечивающего максимальное отличие, образующихся наночастиц в магнитном поле и без поля;</li> <li>3. Анализ процесса нуклеации и спиновой динамики в магнитном поле, обуславливающие экспериментально наблюдаемые результаты;</li> </ol>

<b>Перечень графического материала</b>	– Презентация
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:</b>	
1 Обзор научно-технической литературы по плазменным методам формирования и контроля размеров наночастиц	
2 Проведение экспериментальных исследований по получению наночастиц из лазерной плазмы	
3 Анализ спиновой динамики и процесса нуклеации паров оксидов кремния, циркония и алюминия из лазерной плазмы	
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
5 Социальная ответственность	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	20.04.2018
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Мышкин В.Ф.	д.ф.-м.н.		20.04.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Миклашевич Л.А.		20.04.2018

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Миклашевич Леонид Андреевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Принять по действующим ценам
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	–
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Организация и планирование работ	– Расчет продолжительности этапов работ; – Построение линейного графика работ; – Расчет накопления готовности проекта.
2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта	Выполнено
3. Оценка экономической эффективности	Выполнено

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

Линейный график работ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.2019
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В. Ю.	К.Э.Н.		22.04.2019

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Миклашевич Л.А.		22.04.2019

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Миклашевич Леонид Андреевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– правила обращения с лазером;</li> <li>– правила обращения с муфельной печью.</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);</li> <li>– защита от лазерного излучения;</li> <li>– термическая безопасность.</li> </ul>

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Миклашевич Леонид Андреевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Уровень образования Бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

28.05.2019 г.

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.05.2019	Обзор научно-технической литературы по плазменным методам формирования и контроля размеров наночастиц	
20.05.2019	Проведение экспериментальных исследований по получению наночастиц из лазерной плазмы	
27.05.2019	Анализ спиновой динамики и процесса нуклеации паров оксидов кремния, циркония и алюминия из лазерной плазмы	
22.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
15.05.2019	Социальная ответственность	

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Мышкин В.Ф.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 89 с., 20 рис., 14 табл., 27 источников, 0 прил.

Ключевые слова: лазер, лазерный пробой, плазма, нуклеация, наночастицы, спин, спиновая химия.

Объектом исследования являются дисперсные наночастицы оксидов алюминия и циркония.

Цель работы – исследование влияния внешнего постоянного слабого магнитного поля на размеры наночастиц, формируемых в газовой фазе в результате лазерного пробоя подложки из оксидной керамики.

В процессе исследования проводились: подбор параметров оптимальных лазерного излучения и магнитного поля; напыление наночастиц оксидов на медную и алюминиевую фольги; исследование размеров дисперсных частиц с помощью методов седиментации и электронной микроскопии.

В результате исследования построена феноменологическая модель протекающих процессов и проведен анализ размеров микрочастиц для верификации теории.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки: средняя мощность излучения лазера 20 Вт, длина волны излучения 1,064 мкм, частота излучения 20 – 100 кГц, длительность импульса 200 нс, скорость сканирования до 8,7 м/с, энергия в импульсе 0,5 мДж, температура в нагревателе 800-900°C, магнитное поле 8 (24) мТл.

Степень внедрения: используется при проведении лабораторных работ.

Область применения: получение дисперсных нанопорошков.

В будущем планируется улучшение процесса улавливания образующихся частиц при помощи электростатической ловушки. Это

позволит улавливать дисперсные наночастицы и проанализировать процесс нуклеации более точно.

## **Перечень определений**

**Гетерогенная низкотемпературная плазма** – плазма, содержащая макроскопические заряженные частицы.

**Плазма** – ионизированный газ, состоящий из свободных электронов, положительно и отрицательно заряженных ионов, нейтральных и возбужденных атомов или молекул.

**Наночастицы** – частицы, размеры которых находятся в нанометровом диапазоне (от 1 до 100 нм).

**Нанопорошок** — твердое порошкообразное вещество, содержащее частицы, размеры которых не превышают 100 нм.

**Оптический пробой** – пробой в газах под действием излучения оптического диапазона (видимое излучение, ближний, средний и дальний ИК диапазон, ультрафиолет).

**Кластер** – объединение нескольких атомов или молекул, обособленное от других молекул и атомов.

**Спин** – собственный момент импульса элементарной частицы.

**Изотопы** – атомы одного химического элемента, имеющие одинаковые числа заряда, но разное массовое число.

**Нуклеация** – процесс образования зародышей новой стабильной фазы из исходной метастабильной.

**Магнитное поле** – силовое поле, которое действует на движущиеся заряды, обладающие магнитным моментом.

## Содержание

Введение.....	14
Глава 1 Обзор литературы.....	16
1.1 Гетерогенная низкотемпературная плазма.....	16
1.2 Плазма лазерного пробоя .....	20
1.3 Формирование конденсированной фазы при охлаждении низкотемпературной плазмы.....	24
1.4 Магнитная активация физико-химических процессов.....	27
1.5 Нуклеация .....	30
1.6 Методы определения гранулометрического состава дисперсных систем	31
Глава 2 Экспериментальные исследования плазменной нуклеации оксида алюминия в магнитном поле.....	37
2.1 Экспериментальная установка.....	37
2.1.2 Настройка экспериментального стенда .....	41
2.2 Оценка количества порошка, образующегося при лазерном испарении ..	42
2.3 Анализ физико-химических процессов при нуклеации паро-газовых систем .....	46
2.4 Анализ результатов.....	52
Выводы .....	55
Глава 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	56
3.1 Организация и планирование работ .....	57
3.2 Продолжительность этапов работ .....	57
3.3 Расчет накопления готовности проекта .....	63
3.4 Расчет сметы на выполнение проекта.....	64
3.4.1 Расчет затрат на материалы .....	64
3.4.2 Расчет заработной платы .....	65
3.4.3 Расчет затрат на социальный налог.....	66
3.4.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	67
3.4.5 Расчет амортизационных расходов .....	68
3.4.6 Расчет прочих расходов.....	69
3.4.7 Расчет общей себестоимости разработки .....	69
	12

3.4.8 Расчет прибыли .....	70
3.4.9 Расчет НДС .....	70
3.4.10 Цена разработки НИР .....	70
3.5 Оценка экономической эффективности проекта .....	70
Глава 4 Социальная ответственность.....	71
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	71
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе с ПВЭМ и установкой.....	73
4.3 Электробезопасность .....	82
4.4 Пожарная и взрывная безопасность .....	83
Заключение .....	86
Список использованных источников .....	87

## **Введение**

Почти 70 элементов в природных условиях представлены двумя и более изотопами, распределенными в твердых телах неравномерно по объему. При этом путем изменения изотопного состава твердых тел возможно улучшить их потребительские качества. Например, теплопроводность, радиационная стойкость. Однако высокая стоимость изотопных материалов сдерживает расширение сферы их применения или исследования свойств, например, прочности и пластичности.

Поэтому актуальны исследования, связанные с поиском и исследованием новых изотопных эффектов. В связи с расширением сферы применения изотопов актуальна разработка методов формирования твердых тел с заданным распределением изотопов по их объему.

Практически все физико-химические процессы сопровождаются преобразованием атомарных или молекулярных орбиталей. Например, при фазовых переходах, сорбции, химических реакциях, радиационном воздействии, механическом разрушении твердых тел. В перечисленных процессах выполняется закон сохранения спина, который сформулирован в виде принципа Паули для спинов неспаренных валентных электронов атомов. Так как неспаренные электроны обладают магнитным моментом, то с помощью внешнего магнитного поля возможно управлять процессами, связанными с преобразованием электронных орбиталей. Поскольку изотопы одного химического элемента отличаются ядерным спином, формирующим внутреннее магнитное поле для валентных электронов, то внешнее магнитное поле по-разному воздействует на физико-химическую активность изотопов с разными ядерными спинами.

Изотопная селективность физико-химических процессов в магнитном поле признана для жидкофазных процессов. В жидкой среде проявляется «клеточный» эффект из-за длительного (до нескольких мкс) взаимодействия двух активных частиц (радикалов). В газовой фазе время взаимодействия

двух радикалов составляет  $10^{-13}$  с. Поэтому разработанная теория магнитного управления процессами в жидких средах не приемлема для газовой фазы.

Цель ВКР – исследование влияния внешнего постоянного слабого магнитного поля на размеры наночастиц, формируемых в газовой фазе в результате лазерного пробоя подложки из оксидной керамики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

1. получить образцы дисперсных частиц в постоянных слабых магнитных полях разной величины и оценить размеры наночастиц, формирующиеся в магнитных полях разной величины;
2. составить феноменологическую модель процессов, объясняющих отличия размеров дисперсных частиц, формируемых в различных магнитных полях;
3. проанализировать изотопный эффект нуклеации оксидов в слабом постоянном магнитном поле.

Научная новизна исследований связана с выдвигаемой феноменологической моделью процессов, протекающих при формировании наночастиц из смеси изотопов в газовой фазе, находящейся во внешнем слабом постоянном магнитном поле. Эта модель может быть использована при разработке методов формирования изотопных структур в твердых телах.

Впервые разрабатывается физическая модель, показывающая изотопную селективность физико-химических процессов в газовой фазе, протекающих во внешнем слабом постоянном магнитном поле.

## **Глава 1 Обзор литературы**

### **1.1 Гетерогенная низкотемпературная плазма**

Гетерогенная низкотемпературная плазма – плазма, содержащая макроскопические заряженные частицы. Это могут быть частицы электрода (при дуговом разряде) или, например, пылинки. Поэтому часто можно встретить название «пылевая плазма». Пылевые частицы активно взаимодействуют, образуя жидкую или кристаллическую структуры, и появляется возможность исследовать плазменные процессы на уровне кинетики.

Гетерогенная плазма достаточно активно применяется в различных исследованиях. Частицы пыли в плазме могут, как появиться самостоятельно из-за каких-либо процессов, протекающих в плазме, так и целенаправленно ввестись в плазму.

Таким образом, у плазменно-пылевых систем есть ряд уникальных свойств. Это простота получения, возможность наблюдения и управления параметрами, непостоянство заряда пылинок, высокая диссипативность, способность образовывать самоупорядоченные структуры, самоорганизация.

Пылевые частицы в плазме заряжаются и становятся частью плазмы. Однако их свойства значительно отличаются от ионов и электронов обычных компонентов плазмы. Частицы пыли могут являться центрами рекомбинации электронов и ионов плазмы. Также за счёт фото-, термоэмиссии и вторичной электронной эмиссии ещё и источником дополнительных электронов. Из-за этого ионное равновесие может значительно изменяться. Заряд пылевых частиц это величина переменная, изменяющаяся во времени и пространстве в зависимости от параметров плазмы. И даже если параметры плазмы не изменяются, заряд частиц будет меняться, т.к. зарядка – процесс стохастический.

Заряд пылевых частиц большой, поэтому потенциальная энергия их электростатического взаимодействия велика. Из-за этого достичь



неидеальности подсистемы пылевых частиц намного проще, нежели электрон-ионной подсистемы. Однако концентрация макрочастиц намного ниже концентраций ионов и электронов. Тем самым становится возможна кристаллизация в системе пылевых частиц [1].

Экспериментально упорядоченные системы пылевых частиц наблюдали впервые в середине 90-х в плазме ВЧ разряда вблизи границы прикатодной области. На рисунке 1.1.1 приведена пространственная структура пылевых частиц в тлеющем разряде постоянного тока.

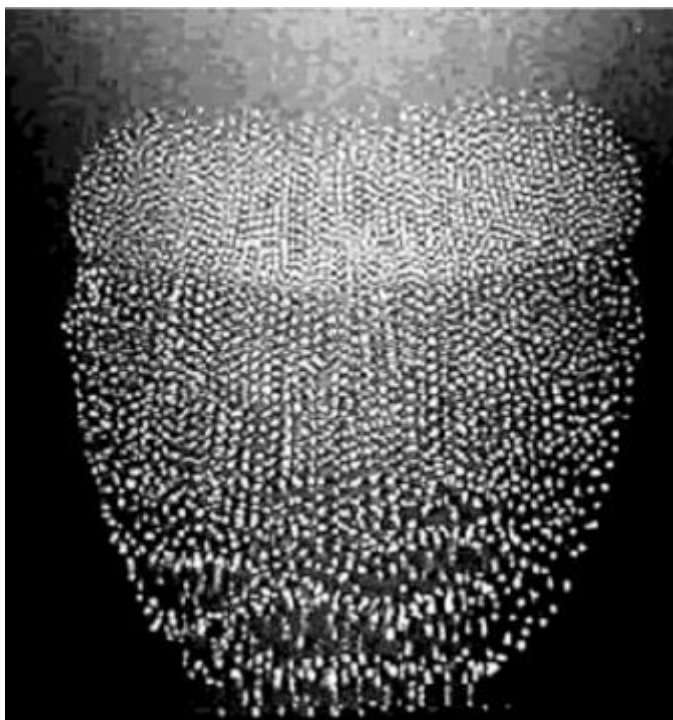


Рисунок 1.1.1 – Вертикальное сечение упорядоченной структуры в тлеющем разряде постоянного тока

В нижней части композиции видно самовозбуждающиеся волны плотности пылевых частиц, в середине видна сильная упорядоченность, в верхней части – области с конвективным движением частиц.

Пылевые частицы существенным образом влияют на коллективные процессы в плазме. Пыль может влиять на эффекты затухания и неустойчивости, модифицировать и определять спектр колебаний. Масса пыли больше масс ионов и электронов плазмы, поэтому наличие этих частиц

изменяет пространственные и временные масштабы в плазме. Так ленгмюровская частота пылевых частиц на несколько порядков меньше ионной. Это приводит к возникновению новых колебаний – пылевого звука, где пыль выступает в роли инерционной компоненты. Частота таких колебаний низкая (10–100 Гц), поэтому эти колебания привлекательны для исследований.

Как уже описывалось выше, у пылевой плазмы есть необычные свойства, которые делают её интересным объектом для изучения. Помимо этого, из-за этих свойств пылевая плазма также может служить инструментом для исследования фундаментальных свойств сильнонеидеальной плазмы и кристаллов. Также размеры частиц достаточно велики, чтобы их можно было увидеть невооружённым глазом или при помощи простейшей оптики. Это позволяет упростить методы диагностики как самих частиц, так и плазмы. Помимо этого из-за размера частиц можно проводить прямые измерения с определением функции распределения по импульсам и координатам, что позволяет изучить процессы переноса, фазовые переходы, низкочастотные колебания и т.д.

В 90-х в микроэлектронике развиваются и широко распространяются технологии плазмонапыления, ионно-плазменного травления, а также производство дисперсных частиц и тонких плёнок. Это приводит к росту интереса к исследованиям пылевой плазмы. Пылевые частицы в плазме приводят к сильному загрязнению рабочей поверхности, что ухудшает её качество. Помимо этого пылевые частицы могут непредсказуемо возмутить плазму, что приведёт к различным последствиям. Поэтому необходимо понимать процессы, протекающие в пылевой плазме. Чем глубже будут знания в этой сфере, тем сильнее можно повысить эффективность и качество технологических операций.

В таких процессах как: получение дисперсных порошков и плазмохимическое напыление рабочий материал (напыляемый порошок)

вносится в плазменную струю, где за счёт высокой температуры нагревается и разгоняется. Так как у частиц порошка высока как скорость движения, так и нагрева, их экспериментальное изучение это трудоёмкий процесс. Но с помощью численных моделей можно достаточно точно описать поведение отдельных частиц.

Измерение параметров плазмы осложнено рядом причин. Во-первых, процесс нагрева протекает в течение миллисекунд. Во-вторых, плазма имеет собственное излучение. В-третьих, высокая скорость частиц. Вследствие этих причин нельзя применить контактные методы измерения, а бесконтактные сильно ограничены. Так, оптическим методам препятствует излучение плазмы, т.е. чтобы измерить излучение частиц, необходимо отделить их излучение от плазменного [2].

Пылевая плазма находит широко используется уже в течении десятков лет. В основном в технологиях по осаждению аэрозольных частиц в продуктах сгорания тепловых электростанций, плазменном напылении и ещё в ряде других технологий. Приложены большие усилия по снижению загрязнённости плазмы пылевыми частицами в промышленных плазменных реакторах, поэтому можно считать, что эта проблема устранена.

В космических аппаратах, противолодочных буях и т.д. применяются автономные небольшие источники энергии мощностью от 1 до 10 кВт. В таком источнике используется энергия ядерного реактора на  $^{235}\text{U}$  уране, которая преобразуется в электрическую энергию за счёт фотоэлектрических, термоэмиссионных и термоэлектрических преобразователей. У подобных источников КПД очень низок, а производство реактора очень сложно. Вследствие этого, было предложено использовать источники, для которых электрическая энергия конвертируется из энергии радиоизотопов за счёт фотоэлектронного эффекта. Процесс протекает следующим образом. Газовая смесь с радиоизотопами переходит в возбуждённое состояние из-за ионизирующего излучения, после чего испускает излучение в

ультрафиолетовом диапазоне. Это излучение приводит к появлению электродвижущей силы в полупроводнике за счёт фотоэффекта.

## **1.2 Плазма лазерного пробоя**

### **Механизмы возникновения пробоя**

Для возникновения пробоя в газе необходимо создать электронную лавину. Есть два механизма возникновения пробоя.

Предположим, что в области действия электромагнитного поля уже есть «затравочные» электроны. В поле электроны начинают увеличивать свою энергию. В постоянном электрическом поле электрон ускоряется в каком-либо направлении до первого столкновения, после чего рассеивается и передаёт накопленную от поля энергию в тепловую энергию. В осциллирующем поле электрон колеблется и при каждом столкновении энергия его колебаний также переходит в тепловую энергию хаотического движения и скорость такого движения возрастает. Это классическое представление соответствует ситуациям с полями не чрезмерно больших частот. СВЧ - диапазон также относят сюда. В случае оптических частот механизм можно описать следующим образом. Электрон получает энергию, поглотив фотон при столкновении с атомами газа. Это обратный процесс по отношению к тормозному испусканию фотонов при рассеянии электронов на нейтральных атомах. В итоге, накопив достаточно энергии, электрон ионизирует нейтральный атом, и рождаются два медленных электрона и процесс начинается заново. Таким образом, возникает электронная лавина.

Но для этого необходимы сильные поля. Если это условие выполняется, то возникает лавина и как следствие пробой в газе. Если сильных полей нет, то пробоя не возникнет из-за наличия процессов, приводящих к торможению лавины и препятствующих ей развитию. К таким процессам относят: уход электронов из области действия поля, потери

энергии электронов при упругих и неупругих соударениях с атомами. Эти потери необходимо компенсировать, а для этого необходимы сильные поля.

Второй механизм имеет чисто квантовую природу, и применим непосредственно для оптических частот. Атом может одновременно поглотить сразу несколько фотонов (многоквантовый фотоэффект) и исторгнуть из себя электрон. Одноквантовый фотоэффект для видимых частот невозможен, потому что потенциал ионизации в несколько раз превышает энергии квантов. Следовательно, для ионизации атому необходимо поглотить сразу несколько фотонов, а этот процесс маловероятен. Однако при росте интенсивности излучения скорость того процесса резко возрастает. Интенсивность должна быть высокой, такой, что при ней возникнет оптический пробой. Также важно упомянуть, что газ не должен быть разряжен, иначе электрон не успеет испытать много столкновений и вылетит из области действия из-за чего лавина не будет развиваться и пробоя не возникнет [5].

### **Первые измерения пороговых полей**

Майерэнд и Хот исследовали оптический пробой, проведя измерения интенсивности полей, необходимых для пробоя гелия и аргона, при разных давлениях газа. Схема установки, на которой проводился их эксперимент, приведена на рис. 1.2.1. Эта схема типична для большинства опытов в этой области.

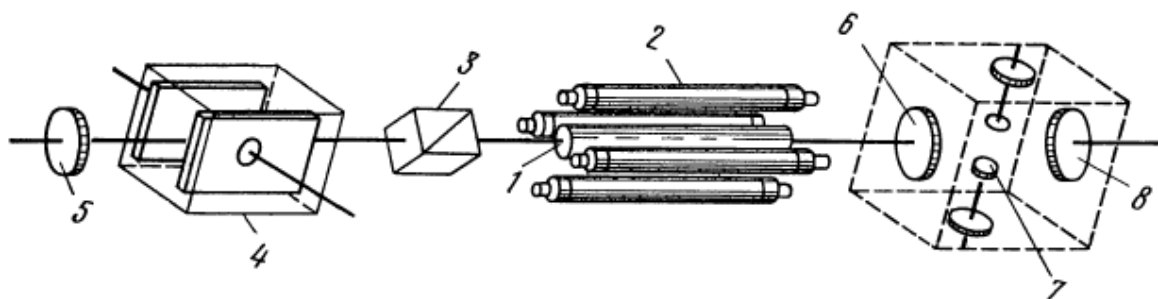


Рисунок 1.2.1 – Схема опыта по измерению порогов оптического пробоя: 1 – рубин; 2 – ксеноновые лампы; 3 – поляризатор; 4 – ячейка Кемма; 5 – зеркало; 6 – фокусирующая линза; 7 – собирающие электроды; 8 – окно

Рубиновый стержень (длина 15 см, диаметр 1,3 см) накачивается четырьмя ксеноновыми импульсными лампами, через которые разряжались конденсаторные батареи. В результате получался гигантский импульс с пиковой мощностью 30 МВт и длиной импульса 30 нс. На рисунке 1.2.2 приведены осциллограммы для световых потоков, прошедших через фокус при фокусировке излучения линзой.

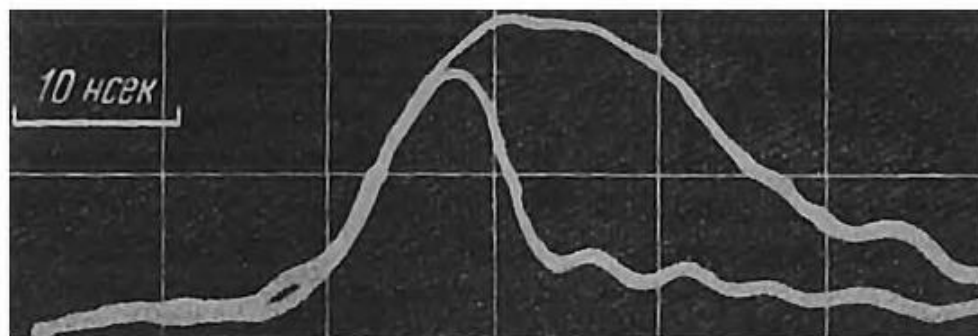


Рисунок 1.2.2 – Осциллограммы гигантского импульса рубинового лазера

Первая соответствует условиям, когда пробоя нет, т.е. мощности излучения недостаточно. Вторая соответствует пробой. Видно, что при некотором значении ионизации в фокусе возникает пробой и образовавшаяся плазма поглощает остальную часть излучения.

Интенсивности излучения лазера, даже в гигантском импульсе, недостаточно для пробоя, поэтому луч фокусируют в маленькую точку.

На рисунке 1.2.3 представлены пороговые значения поля для пробоя аргона и гелия излучением лазера по данным Майерэнда и Хота.

### **Лавинная ионизация и пробой**

Скорость образования лавины зависит не только от нарастания энергии поля. Она также сильно зависит от потерь, которые её тормозят. Потери бывают 2 видов: потери энергии электронов при упругих и неупругих соударениях с атомами и потери самих электронов. При упругих соударениях электрон теряет малую часть своей энергии (порядка отношения масс

электрона и атома). Эти потери сопровождают процесс нарастания энергии электрона с начала и до конца, причем чем легче газ, тем выше роль этих потерь. Неупругие столкновения возникают по мере достижения электроном энергии, близкой к энергии ионизации. Процесс ионизации вероятностный, т.е. электрон, имеющий энергию ионизации, при столкновении с атомом не обязательно ионизует его. Он может только возбудить его и потерять свою энергию.

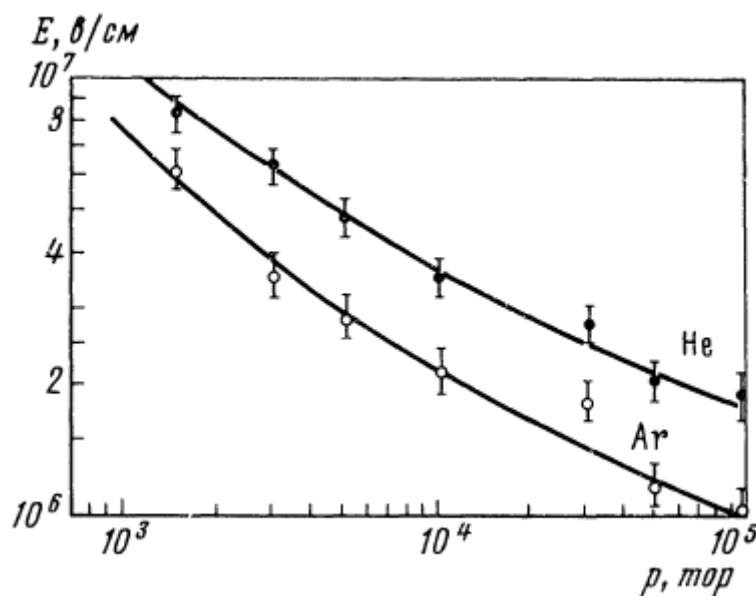


Рисунок 1.2.3 – Пороговые поля для аргона и гелия излучением рубинового лазера

Для оптического пробоя это не проблема. Возможны условия, когда такие возбужденные атомы начинают участвовать в процессе размножения. Излучение вырывает электрон из возбуждённого атома и этот электрон начинает набирать энергию и разгоняться. Вырвать электрон из возбуждённого атома значительно легче, чем ионизировать нейтральный атом. Так для аргона: потенциал ионизации  $I = 15,8$  эВ, потенциал возбуждения нижних уровней  $I = 11,5$  эВ, энергия связи электрона в

возбужденном состоянии  $\delta I = 4,3$  эВ, т.е. для отрыва электрона достаточно трёх фотонов рубинового лазера.

Потери самих электронов связаны с их диффузией из области действия поля. Для оптического пробоя – уход из фокусного пятна.

Порог пробоя определяется потерями и как следствие значениями поля, для их компенсации. Однако роль этих потерь в общем результате различная. Размножение электронов в лавине это своего рода цепная реакция. Потери энергии не оборвут цепь, а только замедлят её (но если потери энергии электрона не чересчур большие). А вот потери электронов как раз разорвут цепь и пресекут дальнейшее развитие лавины.

### **1.3 Формирование конденсированной фазы при охлаждении низкотемпературной плазмы**

Как было описано ранее, частицы пыли в плазме могут кристаллизироваться, конденсироваться и распадаться. Т.е. они могут образовывать систему конечного числа связанных атомов или молекул, т.е. кластеры. Кластеры отличаются от макроскопических частиц наличием магических чисел. Параметры макроскопических частиц являются монотонными функциями числа атомов частицы, тогда как в кластерах из-за магических чисел эти самые функции будут иметь экстремумы. Кластер с магическим числом атомов характеризуется более высокими значениями энергии связи, энергии ионизации и энергии сродства к электрону по сравнению с кластером, содержащим на 1 атом больше или меньше.

У кластера высокая удельная площадь поверхности, что отличает его от макроскопических систем. От числа атомов напрямую зависят параметра кластера, что позволяет регулировать их в собранных из кластеров материалах размером находящихся внутри кластеров.

У образования кластеров есть особенности. Система из пара, конденсата и кластеров при термодинамическом равновесии находится, в



основном, в газообразном или конденсированном состоянии. Поэтому в неравновесных условиях образование кластеров будет протекать в момент, когда газ переходит в конденсированную фазу из-за охлаждения [3].

В экспериментах с пылевой плазмой пылевые частицы вводят преднамеренно, но они также могут и самостоятельно образоваться. Источников их зарождения несколько. Первый – это конденсация, приводящая к появлению капель и твёрдых частиц. Этот процесс характерен для расширяющейся плазмы, в частности для плазмы адиабатически расширяющейся в вакуум. Вторым источником – появление зародышей новой фазы из-за протекающих химических реакций. Ещё один источник это эрозия электродов и стенок газоразрядной камеры. Находясь в разряде, частицы могут расти. Как пример такого механизма можно представить поверхностную рекомбинацию ионов, приводящую к постоянному осаждению материалов на поверхности частиц. Т.е. пылевая частица будет служить центром нуклеации, что может привести к образованию кластеров.

Приведём один из способов образования и роста частиц. Он состоит из четырёх этапов. Первый – это образование первичных кластеров. Вторым – после прохождения критического размера (т.е. количество частиц в кластере становится магическим) начало гетерогенной конденсации. Третьим – процессы агломерации и коагуляции. И четвёртым – конденсация мономеров на многозарядных кластерах. Однако приведённый механизм является лишь частным случаем и, в целом, механизм образования пылевых кластеров изучен не до конца [1].

Конденсация кластеров начинается при высоких температурах, когда диссоциация молекул и испарение кластеров не позволяют образовываться связанным атомным системам. Со снижением температуры из-за расширения газа константы скоростей этих процессов резко уменьшаются и, как следствие, при определённых температурах начинается конденсация. Однако конденсация сопровождается выделением энергии, что приводит к нагреву

расширяющегося пара и препятствует его конденсации. Буферный газ ускоряет процесс образования молекул из пара и забирает избыток энергии, выделившийся при конденсации.

В процессе расширения и охлаждения пара его температура снижается до значения, при котором возможна его конденсация. Конденсация происходит из-за процессов прилипания атомов к кластеру и в результате коагуляции по следующей схеме:



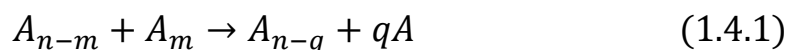
где  $n$ ,  $n - m$  – число атомов в ассоциируемом кластере. Конденсация заканчивается, когда плотность кластера становится настолько мала, что прекращаются столкновения с их участием.

В результате роста кластеров выделяется энергия, тратящаяся на испарение атомов кластера. Энергию, выделяющуюся в процессе (1.4.1) можно найти как:

$$\Delta E = A \left[ m^{\frac{2}{3}} + (m - n)^{\frac{2}{3}} - n^{\frac{2}{3}} \right] \quad (1.4.2)$$

Выделяемая энергия создана поверхностной энергией кластера. Поэтому она по сравнению с полной энергией кластера мала, но если кластер большой, то превышает энергию связи поверхностного атома.

Из-за выделения этой энергии при ассоциации кластеров увеличивается температура образуемого кластера относительно температуры объединяемых. Это вызывает испарение поверхностных атомов. Распад сопровождается освобождением отдельных атомов, потому что освобождение молекул и фрагментов маловероятно. Поэтому можно сделать вывод, что возбуждённый кластер может последовательно освободить несколько атомов и тогда процесс роста кластера вместо 1.4.1 примет вид:



где  $q$  – число освобождённых атомов кластера.

Другой особенностью роста кластера является функция распределения по размерам. Она определяется совокупностью процессов образования кластеров в плазменной системе. Пример такой функции распределения представлен на рисунке 1.4.1.

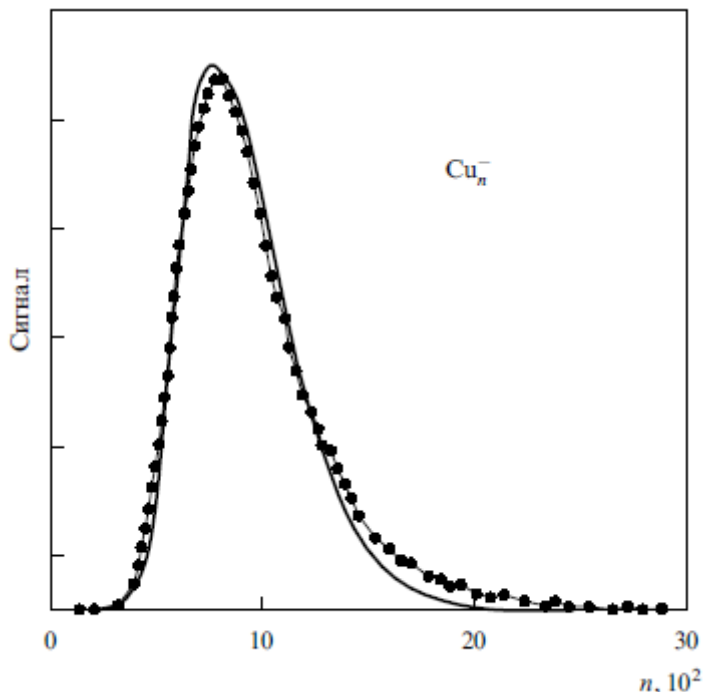


Рисунок 1.4.1 – Распределение по размерам кластеров меди с отрицательным зарядом

Здесь отрицательные ионы кластеров получают при прилипании электронов к нейтральным кластерам. Константа скорости растёт с размерами кластеров, поэтому в распределении заряженных кластеров малые кластеры вырезаются.

#### 1.4 Магнитная активация физико-химических процессов

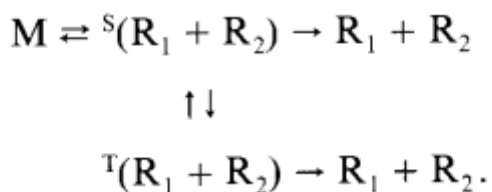
Химическими реакциями управляют – разрешают или запрещают – 2 составляющие – энергия и спины реагентов. Запрет по энергии не однозначен, его можно обойти под энергетическим барьером – туннелирование, – если не хватает энергии. Запрет по спинам такой возможности не даёт. Его нельзя обойти. Поэтому важно знать влияние спинов на хим. реакцию. Этим вопросом занимается спиновая химия. В ней

есть один основополагающий принцип: химические реакции разрешены только таких спиновых состояний, для которых суммарный спин совпадает со спином продуктов.

Спиновая химия изучает влияние магнитных взаимодействий на протекание химических реакций. Магнитные взаимодействия наравне с энергетическими влияют на протекание реакции. Однако вклад и роль у них разная. Поскольку значения магнитных взаимодействий малы по сравнению с энергетическими, то соответственно и вклад их будет меньше. Магнитные силы управляют спиновыми взаимодействиями, тем самым направляя реакцию в разрешённую или запрещённую сторону [8].

### **Спиновые состояния**

Радикальная пара может быть в состоянии с суммарным спином равным 0 (синглет), либо 1 (триплет). В этих состояниях вероятность рекомбинации может отличаться. Так для органических радикальных пар рекомбинация возможна только в синглетном состоянии. При помощи магнитного поля можно изменять движения спинов и, следовательно, состояния.



Здесь M – молекула, R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> – радикалы. Горизонтальные стрелки – процессы, связанные с диффузией радикалов и диссоциацией молекул. Вертикальные стрелки – спиновая динамика радикальной пары, синглет-триплетный переход.

На рисунке 1.4.1 представлена векторная модель состояний спинов.

Из-за разницы ларморовских частот прецессии спинов конфигурация спинов может переходить из синглетного (S) состояния в триплетное состояния с нулевой проекцией спина (T<sub>0</sub>) [10].

## Магнитный изотопный эффект

В радикале можно выделить 2 спиновые системы: электронную и ядерную. Они связаны между собой магнитным сверхтонким взаимодействием. Магнитный (или ядерно-спиновый) изотопный эффект (МИЭ) – это явление, характеризующее зависимость скорости химической реакции между радикалами от магнитных моментов ядер и энергии сверхтонкого взаимодействия.

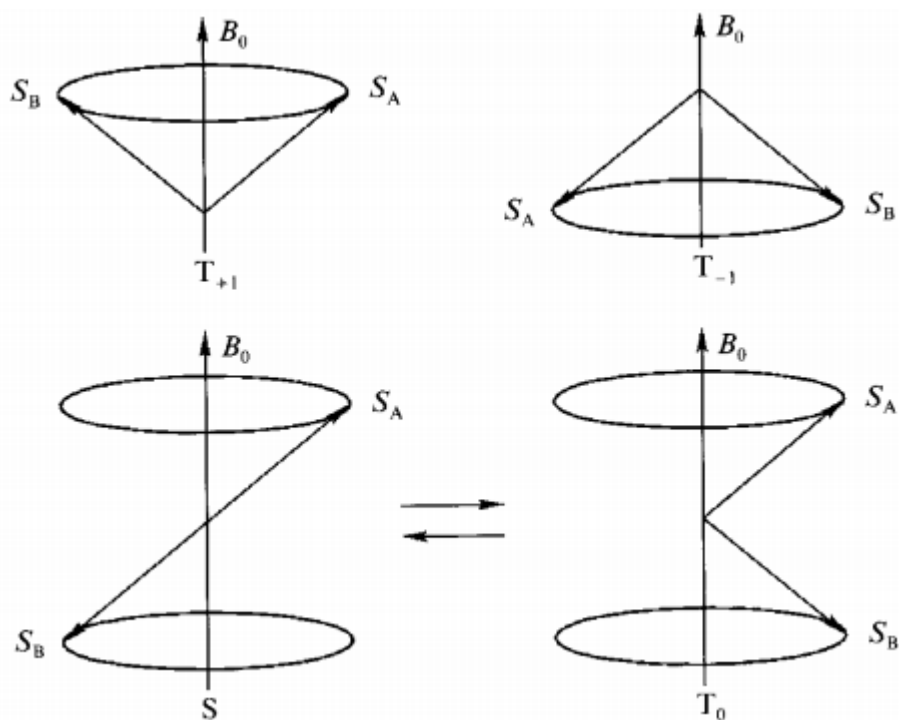
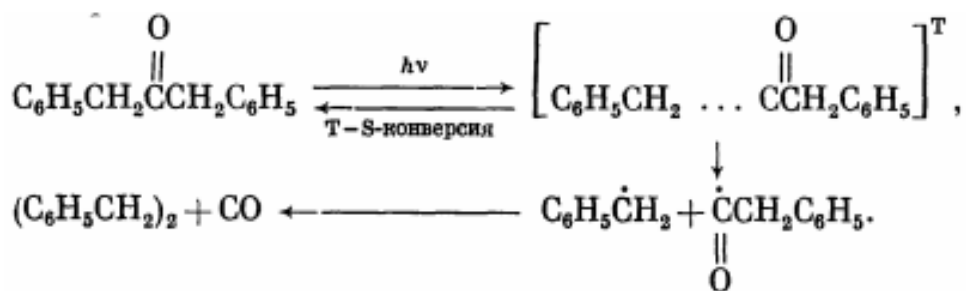


Рисунок 1.4.1 – Векторная модель состояний спинов

Этот эффект виден на примере реакции фотолиза дибензилкетона. Под действием ультрафиолетового излучения молекула распадается из триплетного состояния с образованием триплетной радикальной пары:



В ходе реакции образуется дибензил ( $C_6H_5CH_2$ )<sub>2</sub>, и оксид углерода CO. Образовавшаяся триплетная пара



в дальнейшем может перейти в синглетное состояние и восстановить изначальную молекулу дибензилкетона. Либо она за счёт диффузии развалится в растворе на дибензил и CO. Вероятность обоих превращений радикальной пары зависит от скорости Т–S конверсии и от того, магнитные ли ядра углерода в радикале или нет. В радикалах присутствуют 2 изотопа углерода:  $C^{12}$  и  $C^{13}$ . 12 – немагнитный, а 13 – магнитный. Поэтому если в радикалах  $C_6H_5\dot{C}H_2$  и  $C_6H_5CH_2\dot{C}O$  присутствует  $C^{13}$ , то радикальная пара перейдёт в синглетное состояние, рекомбинирует и восстановится до дибензилкетона, обогатившись по 13 изотопу углерода. Триплет-синглетная конверсия пар, где присутствует немагнитный  $C^{12}$  отстаёт, и такая пара развалится на дибензил и CO и обогатится по 12 изотопу [Зельдович Я.Б.,].

### 1.5 Нуклеация

Образование зародышей новой фазы – нуклеация, относится к числу давно известных физических явлений. Однако многие результаты экспериментов и исследований нуклеации так и не получили полностью описывающее их теоретическую основу. К ним относится и один из наиболее важных экспериментальных результатов, а конкретно установление факта, что при конденсации пересыщенных паров некоторых малолетучих веществ, эффективными центрами нуклеации могут служить отдельные молекулы или атомы искусственно введенной активной примеси. Такие центры нуклеации назвали молекулярными ядрами конденсации (МоЯК), а само явление нуклеации на МоЯК — эффектом МоЯК [11].

Нуклеация сопровождает фазовые переходы первого рода. Чтобы зародыш новой фазы появился, необходимо разделить 2 фазы: старую и

новую. Т.е. необходимо сформировать поверхность раздела. Но для этого нужна энергия. Энергию берут от перегрева расплавов и растворов относительно температуры фазового перехода, а также от переохлаждения газов.

Один из крупнейших вкладов в исследования процессов нуклеации внёс Гиббс в 1878 г. Он сформировал термодинамические критерии образования зародышей новой фазы и заложил основы описания скорости процесса нуклеации. В 1940 – 1950 благодаря работам Зельдовича и Френкеля появилась «классическая теория нуклеации».

Почти все современные теории образования зародышей из пересыщенного пара основаны на модели Сцилларда. В этой модели пересыщенный пар состоит из смеси мономерных молекул и кластеров, содержащих различное количество атомов. Кластер может как расти за счет присоединения свободных атомов и более мелких кластеров, так и уменьшаться за счёт испарения.

Целью теории нуклеации является определение скорости образования стабильных кластеров конденсированной фазы в единице объема при заданных внешних условиях, а также определение размера, при котором эти кластеры будут стабильными [12].

## **1.6 Методы определения гранулометрического состава дисперсных систем**

При анализе гранулометрического состава подлежат решению две задачи: определение размеров частиц и определение доли в процентах частиц различных классов крупности.

Методы определения гранулометрического состава могут быть прямыми или косвенными.

Прямые методы – методы непосредственного измерения размеров частиц. Например, использование микроскопа или другого устройства для тех же целей. На практике применяются редко.

Косвенные методы – группа методов, базирующихся на измерении различия в скорости осаждения частиц разных размеров в газах или жидкостях.

Поскольку грунт это дисперсная система, то дальнейшее описание методов будет применено к нему. Методы измерения гранулометрического состава чётко прописаны в нормативных документах.

Согласно [14] выделяется несколько фракций. Они приведены в таблице 1.6.1. В зависимости от размеров частиц используется тот, или иной метод.

Таблица 1.6.1 – Классы частиц

Фракции (частицы)	Размер частиц, мм
Валунные (глыбовые)	>200
Галечниковые (щебенистые)	10 – 200
Гравийные (дресвяные)	2 – 10
Песчаные	2 – 0,05
Пылеватые	0,05 – 0,005
Глинистые	< 0,005

Методы определения гранулометрического состава:

1. Ареометрический.

Частицы помещают в суспензию. Затем ареометром определяют плотность суспензии грунта через равные промежутки времени. В зависимости от размеров частиц скорость погружения будет разной. Далее по полученным результатам рассчитывают размер и концентрацию определяемых частиц. Так можно определить концентрацию частиц размерами до 0,1 мм.



Устройство ареометра представлено на рисунке 1.6.1. Принцип действия ареометра основан на законе Архимеда: на погружённое в жидкость тело действует сила, равная весу вытесненной им воды. При постоянном объёме сосуда, в который погружается ареометр, глубина погружения будет зависеть от плотности жидкости. Т.е. суспензии грунта. Чем плотность больше, тем меньше глубина, на которую погружается ареометр [14].

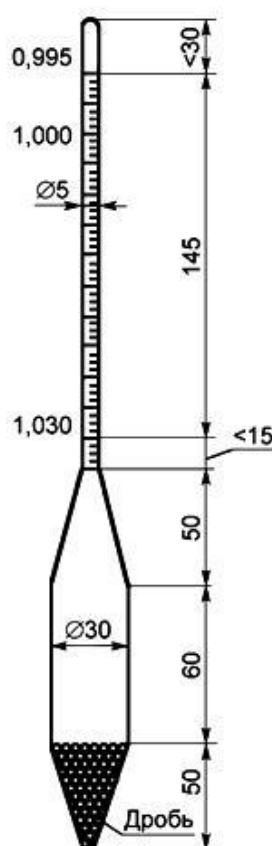


Рисунок 1.6.1 – Схема ареометра со шкалой 0,995-1-1,030 и ценой деления 0,001

## 2. Пипеточный.

В основе этого метода лежит зависимость скорости осаждения различных (по размерам) частиц в неподвижной воде.

Скорость осаждения частиц ( $v$ , см/с) определяется по формуле Стокса:

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\eta} \quad (1.6.1)$$

где  $r$  – радиус частиц, см;  $\gamma_s$  – плотность частиц, г/см<sup>3</sup>;  $\gamma_w$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>;  $\eta$  – коэффициент вязкости воды.

Затем с разных глубин, пипеткой берутся пробы, высушиваются и взвешиваются. После чего можно составить общее представление о размерах частиц и их концентрации в грунте.

### 3. Ситовой.

Этот метод используется в комбинации с предыдущими и лежит между прямыми и косвенными методами. Он заключается в просеивании грунта через набор сит. С их помощью происходит разделение частиц по фракциям. На каждом сите будет оставаться та фракция частиц, размер которых больше диаметра отверстий. Таким образом, есть ограничение на границы применимости этого метода (не подходит для очень мелких частиц).

На рисунке 1.6.1 представлен пример устройства для определения гранулометрического состава.



Рисунок 1.6.2 – Анализатор ситовой ВП-30Т

После определения размера частиц в грунте, строят наглядное изображение состава. Это может быть интегральная кривая либо треугольная диаграмма (треугольник Фере).

Интегральная кривая это график, показывающий суммарное содержание фракций мельче определенного диаметра. По оси абсцисс откладывают логарифмы диаметров частиц, а по оси ординат – суммарное содержание фракций в процентах в нарастающем порядке от наименьшего диаметра к наибольшему. Пример такого графика представлен на рисунке 1.6.3.

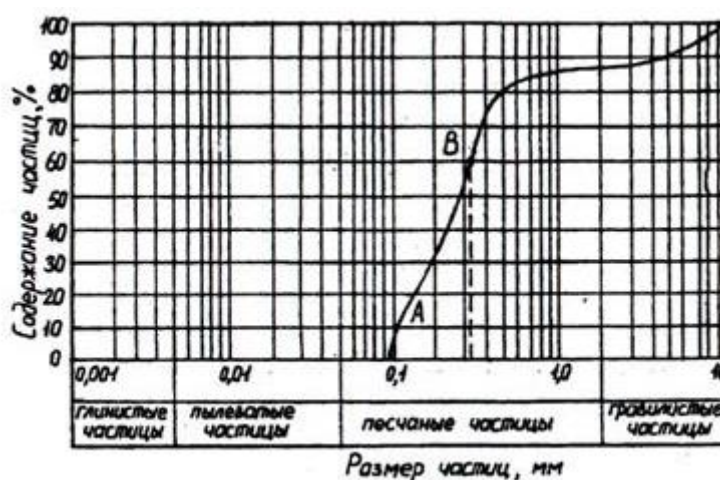


Рисунок 1.6.3 – Интегральная кривая гранулометрического состава

Диаграмма – треугольник Фере позволяет изобразить содержание трех основных фракций — песчаной, пылеватой и глинистой. Чтобы построить такую диаграмму, нужно разделить каждую сторону на 100 частей. Это будут процентные содержания одной из основных фракций. Затем из нужного значения каждой фракции старится перпендикуляр. Точка пересечения трёх таких перпендикуляров даст изображение гранулометрического состава образца. На рисунке 1.6.4 приведен пример треугольника Ферре для 3 различных образцов.

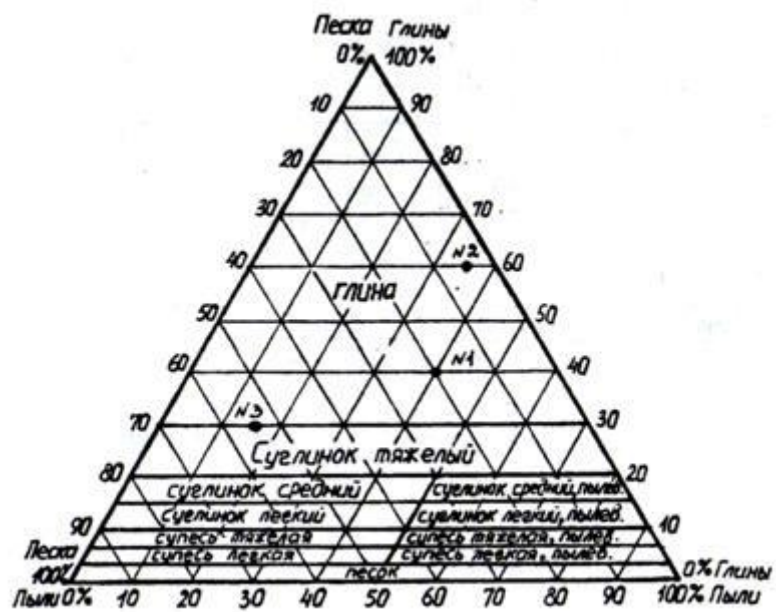


Рисунок 1.6.4 – Треугольник Фере

## Глава 2 Экспериментальные исследования плазменной нуклеации оксида алюминия в магнитном поле

### 2.1 Экспериментальная установка

Известно, что в низкотемпературной плазме можно перевести в газовую фазу все тугоплавкие вещества. Однако, все методы плазменной газификации имеют различные области применения. Наиболее простой способ получения атомов тугоплавких веществ в газовой фазе – лазерный нагрев. При этом пары испаряемых веществ не загрязняются материалами электродов или конструкционных элементов, как в дуговой плазме.



Рисунок 2.1.1 – Фото экспериментальной установки с подложкой из  $\text{Al}_2\text{O}_3$

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы была использована экспериментальная установка для исследования формирования дисперсных частиц в магнитных полях различной величины индукции. Фотография экспериментальной установки изображена на рис. 2.1.1, а принципиальная схема этой установки изображена на рис. 2.1.2.



Рисунок 2.1.2 – Фото экспериментальной установки с омическим нагревателем

Температура внутри омического нагревателя оказалась недостаточно высокой для оказания какого-либо эффекта на процесс, поэтому было принято решение не использовать его.

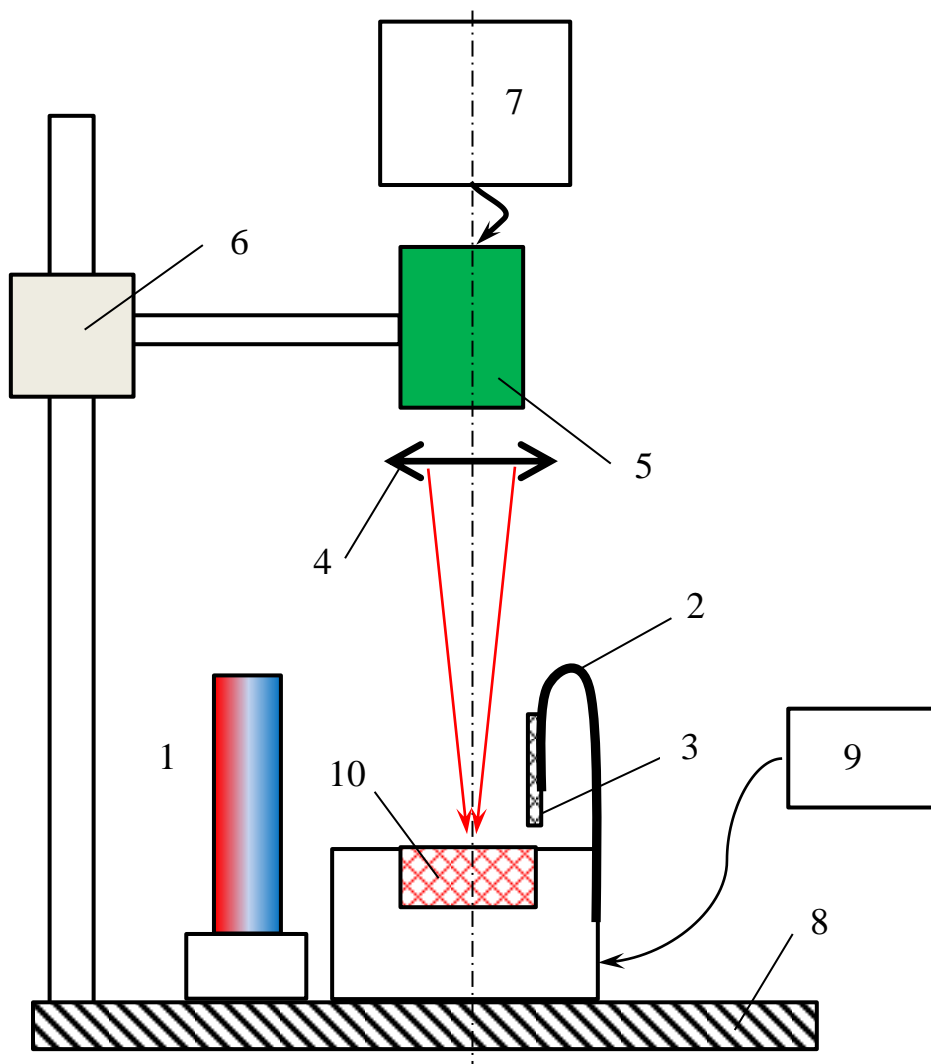


Рисунок 2.1.3 – Схема экспериментальной установки

На рисунке 2.1.2 приведены следующие обозначения:

- 1) Постоянный магнит с остаточной намагниченностью 1,1 Тл;
- 2) Держатель подложки;
- 3) Подложка из алюминиевой или медной фольги;
- 4) Объектив;
- 5) Оптический блок формирования лазерного пучка;
- 6) Штатив с направляющими для перемещения по осям X, Y, Z;
- 7) Волоконный лазер IPG-Photonics
- 8) Рабочий стол;
- 9) Блок питания омического нагревателя;



10) Испаряемая подложка из оксида алюминия.

### 2.1.1 Лазерная установка «Мини маркер 2» на основе волоконного лазера

Лазерная установка «Мини маркер 2» выполнен на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG-Photonics производства "НТО "ИРЭ-Полюс" Россия. На рис. 2.1.1.1 приведен внешний вид лазера. Технические характеристики лазера IPG-Photonics приведены в таблице 2.1.1.1.



Рисунок 2.1.1.1 – Волоконный иттербиевый импульсный лазер IPG-Photonics «Мини маркер 2»

Таблица 2.1.1.1 – Параметры волоконного лазера

Длина волны лазерного излучения	1,064 мкм
Средняя выходная мощность лазера	20 Вт
Максимальная энергия в импульсе лазера	0,5 мДж или 1,0 мДж
Частота следования импульсов	20 кГц - 100 кГц
Поле обработки	50x50 / 110x110 / 160x160 мм/ 250x250 мм (сменные объективы)
Электропотребление	~220 В, 50 Гц, до 0,7 кВт
Охлаждение	автономное воздушное



При выполнении исследований выставляли следующие значения параметров генерации лазерных импульсов на всё время проведения исследований:

- Средняя мощность излучения – 20 Вт (100%);
- Частота следования лазерных импульсов – 20 кГц;
- Длительность единичного импульса – 200 нс;
- Поле обработки – круги диаметром 2 и 6 мм;
- Скорость перемещения по мишени лазерного пятна – 10 мм/с.

### **2.1.2 Настройка экспериментального стенда**

Нанопорошок напыляли на подложку из алюминиевой или медной фольги. Для этого фольга обезжиривалась, отрезалась в виде полосы 2 см в ширину и скручивалась в цилиндр диаметром 15 мм. Заготавливали заданное количество цилиндрических подложек перед каждой серией испытаний.

Лазерная установка «Мини Маркер 2» управляется с помощью компьютера. В начале включали компьютер, лазерную установку. На основании лазерной установки «Мини Маркер 2» устанавливали омический нагреватель, в который помещали исследуемые образцы.

Для увеличения интенсивности излучения в зоне облучения лазерный луч, как правило, фокусируют. Поэтому образец устанавливали так, чтобы пилотный луч лазера, генерирующего излучение красного цвета, проецировался на центр образца. С помощью специального приспособления выставляли излучатель лазера так, чтобы фокальная плоскость объектива совпадала с поверхностью образца.

На этом предварительная настройка установки заканчивалась. Перечисленные выше действия выполнялись однократно и более не изменялись.

## 2.2 Оценка количества порошка, образующегося при лазерном испарении

По объёму испарившегося оксида можно рассчитать массу вещества, которая перешла в газообразное состояние. Для первой серии экспериментов (1-8) объём испарённого оксида рассчитываться как цилиндр, с основанием диаметра 2 мм и высотой стенок от ~0,1 до ~2,5 мм в зависимости от количества проходов. На рис. 2.2.1 и рис. 2.2.2 представлены фотографии корундовой подложки после 10 и 33 проходов фокусированным лазерным лучом.



Рисунок 2.2.1 Подложка после 10 проходов лазерным лучом



Рисунок 2.2.2 – Подложка после 33 проходов.

Расчёт массы испарённого оксида проведён по формуле 2.1.1:

$$m = \frac{M \cdot V}{V_M} \quad (2.2.1)$$

где  $m$  – масса испарённого вещества;  $M$  – молярная масса вещества, г/моль;  $V_M$  – молярный объём, л/моль.

Так для глубины проникновения луча 0,1 мм и основания диаметром 2 мм объём полученного цилиндра равен 0,314 мм<sup>3</sup>. Тогда масса испарённого вещества будет равна

$$m = \frac{102 \cdot 3,14 \cdot 10^{-8}}{22,4} = 1,4298 \cdot 10^{-7} \text{ г.}$$

Для глубины 1 мм и основания диаметром 2 мм объём цилиндра равен 3,14 мм<sup>3</sup>. Тогда масса испарённого вещества будет равна  $m = 1,4298 \cdot 10^{-6}$  г.

Для глубины 2,5 мм и основания диаметром 2 мм объём цилиндра равен 0,000000785 мм<sup>2</sup>. Тогда масса испарённого вещества будет равна  $m = 3,5746 \cdot 10^{-6}$  г.

Для глубины 1 мм и основания диаметром 6 мм объём цилиндра равен 0,000002826 мм<sup>2</sup>. Тогда масса испарённого вещества будет равна  $m = 1,2868 \cdot 10^{-5}$  г.

### **2.2.1 Получение образцов наночастиц оксида алюминия**

Для получения образцов наночастиц выполнялась следующая последовательность действий:

- 1) Устанавливали испаряемый образец в нагреватель;
- 2) Подключали источник питания нагревателя;
- 3) Задавали следующие параметры нагревателя: 80 В; 1,7 А;
- 4) Выдерживали время разогрева нагревателя и образца (до 800<sup>0</sup>С);
- 5) Устанавливали необходимые параметры экспозиции лазерным лучом;
- 6) Устанавливали необходимую геометрию сканирования лазерным лучом по поверхности образца (диаметр области сканирования);
- 7) Устанавливали сменную подложку для напыления образующимся нанопорошком;

8) Устанавливали постоянный магнит на заданном расстоянии от зоны воздействия лазерным лучом на образец;

9) Запускали лазер и выдерживали заданную экспозицию;

10) После окончания программы облучения образец с напылённым порошком помещали в специальный защитный контейнер;

Для получения следующих образцов нанопорошков повторно выполнялась последовательность действий по пунктам 1-10. При этом для каждой заданной величины магнитного поля в начале получали образцы без магнитного поля.

Наночастицы в зоны лазерного пробоя оксида алюминия формировались при следующих условиях:

1. Магнитное поле равно магнитному полю Земли, размер зоны сканирования представляет из себя круг диаметром 2 мм, 3 прохода.

2. Использовали внешнее постоянное слабое магнитное поле 24 мТл. При этом постоянный магнит установлен северным полюсом к зоне лазерного воздействия. Расстояние от задней стороны магнита до зоны сканирования составляло 44 мм, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 3 прохода.

3. Магнитное поле равно магнитному полю Земли, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 5 проходов.

4. Внешнее магнитное поле 24 мТл, магнит расположен северной стороной к зоне сканирования, расстояние от задней стороны магнита до зоны сканирования 44 мм, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 5 проходов.

5. Магнитное поле равно магнитному полю Земли, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 10 проходов.

6. Внешнее магнитное поле 8 мТл, магнит расположен северной стороной к зоне сканирования, расстояние от задней стороны магнита до

зоны сканирования 70 мм, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 10 проходов.

7. Магнитное поле равно магнитному полю Земли, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 33 прохода.

8. Внешнее магнитное поле 8 мТл, магнит расположен северной стороной к зоне сканирования, расстояние от задней стороны магнита до зоны сканирования 70 мм, размер зоны сканирования – круг диаметром 2 мм, 33 прохода.

9. Магнитное поле равно магнитному полю Земли, размер зоны сканирования – круг диаметром 6 мм, 9 проходов.

10. Внешнее магнитное поле 8 мТл, магнит расположен северной стороной к зоне сканирования, расстояние от задней стороны магнита до зоны сканирования 70 мм, размер зоны сканирования – круг диаметром 6 мм, 10 проходов.

### **2.2.2 Исследования образцов при помощи электронной микроскопии**

При средней мощности лазера 20 Вт и длительности импульса 200 нс испаряется незначительное количество порошка до температуры, при которой происходит разрушение оксидов на металл и кислород.

При воздействии на оксид алюминия сфокусированным лучом лазера происходит испарение мишени и формирование сверхзвукового потока пара материала мишени. Пары, сразу выходящие из поля лазерного излучения, охлаждаются и осаждаются на мишени возле зоны воздействия. Пары, находящиеся в каустике лазерного излучения, дополнительно нагреваются вплоть до разложения молекул на атомы и формирования лазерной плазмы. После окончания лазерного импульса плазменное образование охлаждается и формируется нанопорошок. При этом более крупная фракция нанопорошка перемещается под меньшим углом к горизонтали, а самая мелкая фракция подхватывается нагретым воздушным потоком и уносится вверх. Поэтому

самая крупная и самая мелкая фракции порошков не попадали на подложку.

Следует ожидать, что размер образующихся дисперсных частиц находится в нанометровом диапазоне. В связи с этим, образцы порошка изучали с помощью просвечивающей электронной микроскопии на приборе «Просвечивающий электронный микроскоп JEOL JEM-2100F с системой подготовки проб».

Подготовка пробы для просвечивающей электронной микроскопии заключалась в следующем. Подложки с напыленным ранее порошком помещали в контейнер с этиловым спиртом и облучали ультразвуком в течении 30 мин. При этом порошок образовывал суспензию. Суспензия с помощью пипетки наносилась на многослойную сетку. Сетка, кроме основы содержала углеродную плёнку. После испарения этилового спирта наночастицы оказывались на поверхности углеродной плёнки. Использование углеродной плёнки связано с тем, что он имеет высокие теплопроводность, температуру кипения. Поэтому слабо подвержено воздействию электронным пучком.

## **2.3 Анализ физико-химических процессов при нуклеации парогазовых систем**

### **2.3.1 Формирование конденсированных частиц из плазменных условий**

Образование зародышей и формирование дисперсных частиц в многокомпонентной системе начинается с одной компоненты, имеющей при заданных условиях меньшее давление насыщенного пара. Скорость роста первичных частиц ограничивается их нагревом при фазовом переходе до температуры. В дальнейшем возможна более медленная коагуляция несколько остывших частиц. Выделение энергии при образовании агломерата также способствует формированию частицы с единой кристаллической структурой.

Теория нуклеации для образования капель жидкости хорошо

разработана. Известно, что энергия образования нейтрального кластера, в котором можно четко различить поверхность, равна [15, 16]:

$$\Delta G_n = n (\mu_c - \mu_v) + 4\pi r^2(n) \Sigma, \quad (2.3.1.1)$$

где  $n$ -число атомов в кластере,  $\mu_c$ ,  $\mu_v$  - химические потенциалы атомов в конденсированной и газовой фазах соответственно,  $r(n)$  - радиус кластера, состоящего из  $n$  атомов,  $\sigma$  - поверхностная энергия кластера.

Из уравнения (1) следует, что спонтанный рост малых кластеров невозможен из-за увеличения их свободной энергии Гиббса. Напротив, рост капель жидкости с диаметром выше определенного критического значения, сопровождается уменьшением энергии, что способствует их росту. Хотя для жидкостей наиболее стабильной формой является шар, для твердых частиц - микрорекристалл, но термодинамические основы образования жидких капель и твердых частиц одинаковы.

При окончании лазерного импульса пары быстро охлаждаются из-за малого размера очага пробоя. Поэтому пар становится пересыщенным. Следует учесть, что при быстром охлаждении температура начала формирования конденсированных частиц (нуклеация) ниже температуры фазового перехода.

Частота флуктуационного образования ядер конденсации, в зависимости от температуры, устанавливается за  $10^{-9}$  с [17]. При этом ядра конденсации представляют собой кластеры атомов. При высокой температуре рост кластеров зависит от спиновой динамики на их поверхности. Из теории флуктуаций следует, что скорость образования зародышей новой фазы в единице объема за единицу времени:

$$\frac{dN}{d\tau} = \frac{\gamma}{\rho} \sqrt{\frac{2m\sigma}{\pi}} \left( \frac{P}{kT} \right)^2 \exp\left( -\frac{\Delta G}{kT} \right), \quad (2.3.1.2)$$

где  $N$  - численная концентрация капель,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\tau$  - время, с,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $\gamma$  – коэффициент десублимации;  $m$  – масса молекулы пара, кг;  $T$  – температура смеси, К;  $P$  – полное давление

парогазовой смеси, мм рт.ст.,  $\rho$  – плотность сублимата,  $\sigma$  – сила поверхностного натяжения жидкости [18].

Величина  $\gamma$  выражает долю молекул пара, остающихся в результате соударений на твердой поверхности. Поверхностную энергию  $\sigma$  твердой дисперсной частицы, например углерода, можно определить из уравнения [19]:

$$\Sigma = \frac{\Delta H - RT}{V^0} \frac{\Delta n}{n} h, \quad (2.3.1.3)$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии при испарении, кДж/моль;  $R = 8,314$  Дж/(моль.К) – универсальная газовая постоянная;  $n$  – координационное число;  $\Delta n$  – число вакансий для атомов на поверхности кристаллической решетки;  $h$  – толщина монослоя молекул, м;  $V^0 = M:\rho$  – мольный объем твердого вещества, см<sup>3</sup>/моль,  $M$  – молярная масса десублимата, г/моль.

Для протекания физико-химических процессов важны две тенденции: энергетическая и магнитная. Из уравнения (2) видно, что существующая теория нуклеации является энергетической, не учитывающей магнитные взаимодействия. Однако, формирование ядер конденсации протекает вопреки требованию к уменьшению энергии системы. Очевидно, что на этом этапе преобладающим является не уменьшение энергии системы, а магнитные взаимодействия.

### **2.3.2 Спиновая динамика физико-химических процессов при нуклеации паров**

Из соотношения неопределенности  $\Delta s_z \times \Delta \varphi \approx \hbar$  [20] следует, что вектор состояния спина в магнитном поле  $|+1\rangle$ ,  $|-1\rangle$  можно описать

$$N = \frac{2\pi}{\Delta \varphi} \approx \hbar \frac{\Delta s_z}{\hbar} \text{ компонентами.}$$

Считаем, что состояние «пробного» атома, при прецессии в магнитном поле  $B$ , характеризуется  $N_1$  компонентами и изменяется с частотой



$\nu_1 = \mu_B g_1 (B + B_H + a_1) : h$ , где  $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл,  $g = 0-2$ ,  $a = 0-30$  мТл,  $B_H \approx 50$  мТл. Состояние (фаза прецессии) второй сталкивающейся компоненты - случайно. Частота столкновений частиц в газе  $\nu = \nu_{\text{кв}} : \lambda$ , где  $\nu_{\text{кв}}$  - средняя квадратичная скорость,  $\lambda$  - длина свободного пробега.

Расчеты показывают, что скорость формирования ядер конденсации и роста частиц при:

$B \leq a$  ( $a \neq 0$ ) – определяется лишь величиной « $a$ »,

$B < 500$  мТл ( $g=1,5$ ,  $a=0$  мТ) - пропорциональна величине магнитного поля,

$B > 500$  мТл (для любых  $g$  и  $a$ ) – определяется частотой столкновения частиц.

В магнитном поле спин можно описать векторами состояний  $|+1\rangle$ ,  $|-1\rangle$  которые предполагают набор состояний с разными фазами прецессии. Для определения количества компонентов вектора состояния напомним соотношение неопределенности, связывающее проекцию спина и фазу прецессии [20]:  $\Delta s_z \times \Delta \varphi \approx \hbar$ . Поэтому прецессию спина можно описать вектором состояния с  $N = \frac{2\pi}{\Delta \varphi} \approx \hbar \frac{\Delta s_z}{\hbar}$  компонентами.

Логично, что минимальное время, за которое гарантировано формирование синглетного состояния, зависит от частоты столкновений. Количество столкновений, при котором с вероятностью 1,0 формируется синглетная пара, равна  $N_1 \times N_2!$ , где  $N_1$  и  $N_2$  количество компонент векторов состояний прецессии спинов двух радикалов. Для формирования синглета минимально необходимое число столкновений

$$N_1 \times N_2! = 6 \times 7! = 4320 \quad (f_{ss} = 3,24 \text{ МГц}) \quad (2.3.2.1)$$

Частота столкновений частиц при тепловом движении зависят от температуры. Например, для азота при  $T = 300$  К частота столкновений составляет  $\nu_{\text{ст}} = 0,8 \cdot 10^{10}$  Гц, а при  $T = 2500$  К -  $\nu_{\text{ст}} = 1,4 \cdot 10^{10}$  Гц. Время, за

которое реализуется синглет при тепловом движении  $4320/1,4 \cdot 10^{10} = 3 \cdot 10^{-7}$  с. Это соответствует частоте формирования синглетных пар  $f_{ss} = 3,24$  МГц при тепловом движении.

Частота прецессии пропорциональна суммарному магнитному полю в точке пространства, где локализован спин. Если считать, что  $N_1$  характеризует «пробный» атом, то его состояние изменяется периодически пропорционально частоте прецессии в магнитном поле  $B$ , связанной с суммарным полем  $\nu_1 = \frac{\mu_B g_1 (B + B_H + a_1)}{h}$ , где  $a = 0-30$  мТл постоянная сверхтонкой структуры;  $B_H \approx 50$  мТл - магнитное поле Земли,  $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл - электронный магнетон ( $\mu_N = 5,05 \cdot 10^{-27}$  Дж/Тл - ядерный магнетон). При этом можно считать, что состояние второго компонента случайно.

Таблица 2.3.2.1. Частоты прецессии при  $g=0,3$ ;  $a=0$  мТл (изотоп с безспиновым ядром)

$B_{\text{внеш}}, \text{ мТл}$	0	0,05	0,1	0,15	0,3	0,5	1	10
$B_{\Sigma}, \text{ мТл}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,35	0,55	1,05	10,05
$\nu_{\text{пр}}, \text{ Гц}$	$0,35 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$2,45 \cdot 10^6$	<b><math>3,85 \cdot 10^6</math></b>	$7,3 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^7$

Таблица 2.3.2.2. Частоты прецессии при  $g=0,1$ ;  $a=1,5$  мТл (изотоп со спиновым ядром)

$B_{\text{внеш}}, \text{ мТл}$	0	0,05	0,1	0,15	0,3	0,5	1	10
$B_{\Sigma}, \text{ мТл}$	1,5	1,55	1,6	1,65	1,8	2,0	15,05	35,05
$\nu_{\text{пр}}, \text{ Гц}$	$2,94 \cdot 10^6$	$3,04 \cdot 10^6$	$3,13 \cdot 10^6$	<b><math>3,25 \cdot 10^6</math></b>	$3,5 \cdot 10^6$	$3,89 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^7$

Для безспинового изотопа  $B_{\text{кр}} = 0,5$  мТл, для спинового изотопа  $B_{\text{кр}} = 0,15$  мТл.

Поэтому в диапазоне магнитного поля 0,15-0,50 мТл конденсированная фаза будет обогащаться по спиновому изотопу.

Из последних таблиц видно, что при всех комбинациях  $g_i$  и  $a_i$  ( $=0$  или  $\neq 0$ ) во внешнем слабом постоянном магнитном поле частота прецессии спина неспаренного электрона (разность частот двух радикалов) выше, чем частота прецессии без внешнего поля (в магнитном поле Земли).

Частота прецессии спина неспаренного электрона изотопа с

безспиновым ядром пропорциональна величине внешнего поля во всем диапазоне его изменения. Частота прецессии спина электрона спинового изотопа определяется постоянной сверхтонкой структуры  $a$  Зеемановского расщепления во внешнем магнитном поле, меньшем, чем  $a$ . В магнитном поле больше, чем  $a$ , частота прецессии спина неспаренного электрона изотопа со спиновым ядром пропорциональна величине внешнего поля.

Из соотношения частот следует, что формирование синглетной спиновой пары, при  $g=1,5$  и  $a=25$  мТл в газовой фазе, находящейся в магнитном поле менее 500 мТл, с вероятностью 1,0, ограничивается частотой прецессии спинов. Поэтому скорость физико-химических процессов пропорциональна величине внешнего магнитного поля. В магнитном поле более 500 мТл вероятность формирования синглетной пары определяется частотой столкновения частиц при их тепловом движении.

Последние таблицы показывают, что в полях менее 500 мТл магнитное поле увеличивает изотопную селективность физико-химических процессов: химическая реакция в газовой фазе, нуклеация (образование конденсированной фазы при высоких температурах).

Рассмотренная динамика спиновых пар актуальна для химических реакций в газовой фазе, формировании ядер конденсации при фазовых переходах и росте наночастиц при температурах, близких к температуре фазового перехода. Анализ показывает, что в магнитном поле рост дисперсных частиц больше. Поэтому образующиеся частицы имеют больший размер, при практически полном отсутствии мелкодисперсной фракции.

## 2.4 Анализ результатов

Алюминиевая подложка с полученными порошками помещалась в кювету с этиловым спиртом. Кювета облучалась ультразвуком в течении 10 мин. Фотографии суспензии с образцами 9 и 10 сразу после воздействия ультразвуком приведены на рис. 2.4.1. Получили однородную суспензию.

На рис. 2.4.2 приведена фотография кювет через сутки после облучения, а на рис. 2.4.3 - через двое суток. По количеству взвеси видно, что число субмикронных частиц в пробирке из образца 10 в 5-6 раз больше, чем в образце 9. Согласно литературным данным, размер частиц, остающихся в виде взвеси бесконечно долгое время, составляет менее 0,1 мкм.

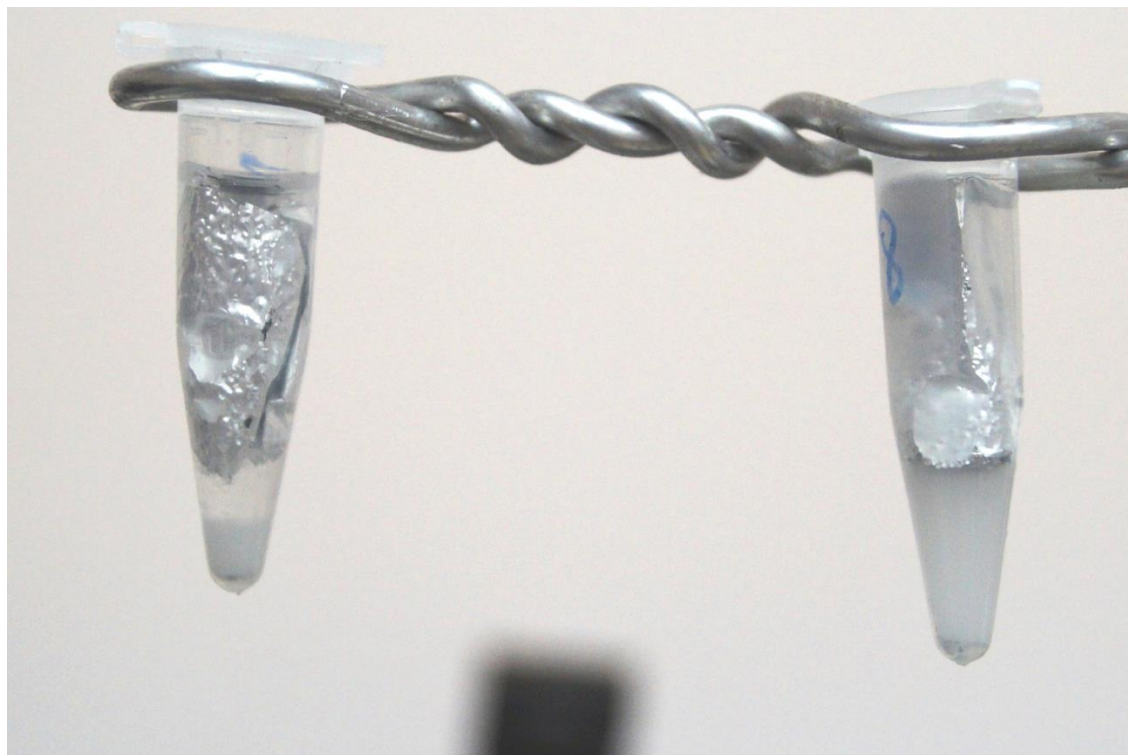


Рисунок 2.4.1 – Образцы сразу после облучения ультразвуком (слева – 50 мкТл, справа – 8 мТл)



Рисунок 2.4.2 – Образцы через сутки после облучения ультразвуком  
(слева – 50 мкТл, справа – 8 мТл)

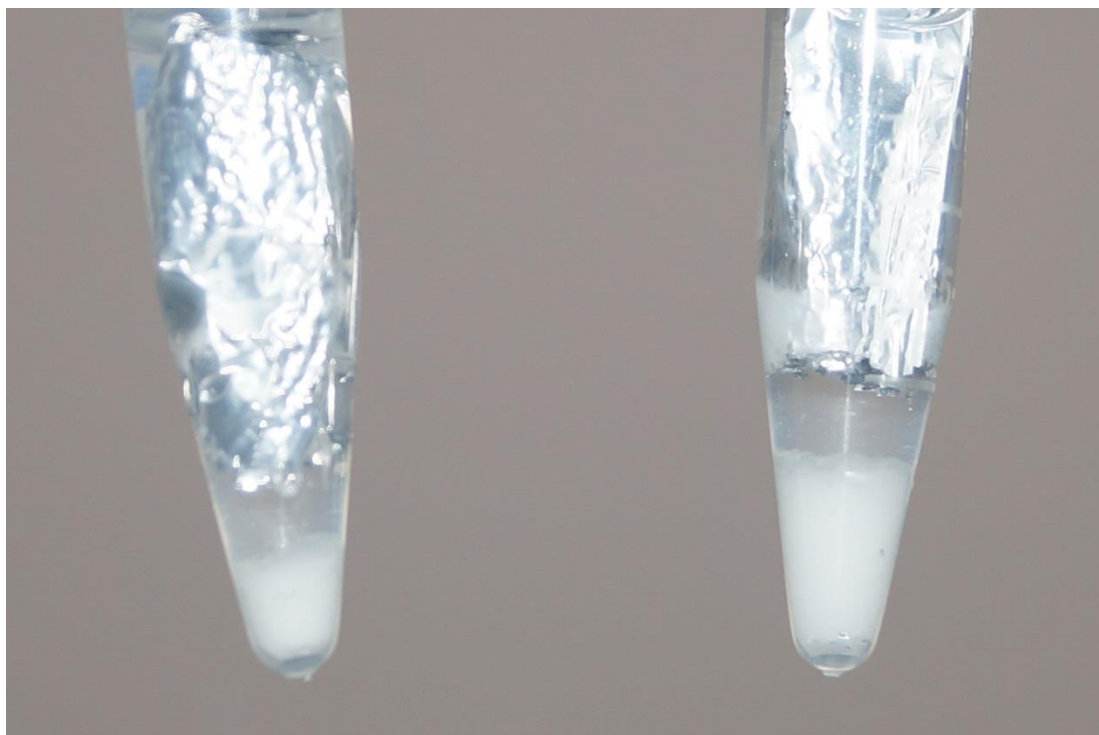


Рисунок 2.4.2 – Образцы через двое суток после облучения  
ультразвуком (слева – 50 мкТл, справа – 8 мТл)

Принимая во внимание факт скорости выпадения осадка, можно сделать вывод о том, что в образце 10 частицы меньше по размерам, чем в 9. Следовательно, магнитное поле препятствовало образованию частиц большого размера.

Это объясняется тем, что и в образце 9, и в образце 10 количество вещества одинаково, но если внешнее магнитное отсутствует, то число ядер конденсации уменьшается, и количество осаждаемого на них вещества больше. В образце 10 напротив – при наличии внешнего магнитного поля число ядер конденсации увеличивается, а так как количество вещества такое же, то и количество осаждаемых частиц на каждом ядре конденсации меньше. Следовательно, размер полученных кластеров становится меньше.

Таким образом, видно, что путем изменяя величины постоянного магнитного поля, можно изменять параметры процессов зарождения кластеров роста и роста дисперсных частиц.

## **Выводы**

1. Были получены субмикронные порошки оксида алюминия из плазмы лазерного пробоя. Установлено, что дисперсные частицы, формирующиеся в слабом постоянном магнитном поле 8 (24) мТл из плазмы лазерного пробоя содержат 5-6 раз больше нанодисперсных частиц размерами менее 0,1 мкм, чем при формировании в магнитном поле Земли.

2. Построена феноменологическая модель процесса нуклеации в паро-газовой смеси. Показано, что на процесс нуклеации паров в газовой фазе влияют энергия и парамагнитные явления.

3. Рассмотрена динамика спиновых пар изотопов, находящихся в газовой фазе и на поверхности ядер конденсации при нуклеации при температурах, близких при температуре фазового перехода. Анализ показывает, что в слабом магнитном поле скорость роста дисперсных частиц пропорциональна величине магнитного поля, а частота формирования ядер конденсации больше. Поэтому атомы из пара распределяются на большее количество дисперсных частиц.

4. Показано, что в резонансном магнитном поле 0,15-0,5 мТл скорость нуклеации изотопа со спиновым ядром увеличивается.

### **Глава 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В современном мире практически все научные открытия рассматриваются с точки зрения экономической ценности, нежели научного веса. Важно уметь оценивать коммерческую сторону проекта, т.к. это одно из условий поиска источников финансирования и дальнейшего экономического применения результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Коммерческая ценность проекта определяется: преимуществом над предыдущими разработками, востребованность на рынке, цена проекта, сроки выполнения и бюджет.

Исходя из вышеперечисленного, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является разработка и создание конкурентных технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Достигнуть этой цели можно выполнением следующих задач:

- оценка перспективности проекта и его экономическое применение;
- составление плана научной работы;
- расчет бюджета научно-технического исследования.



### 3.1 Организация и планирование работ

Таблица 3.1.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Основные этапы	Содержание работ	Должность исполнителя	Загрузка исполнителей
Разработка технического задания	Составление и утверждение технического задания	НР, И	НР – 100% И – 10%
Выбор направления исследований, проведение эксперимента	Подбор и изучение материалов по теме	НР, И	НР – 10% И – 100%
	Календарное планирование работ по теме	НР, И	НР – 100% И – 50%
	Составление схемы эксперимента	НР, И	НР – 80% И – 50%
	Экспериментальное исследование	НР, И	НР – 60% И – 50%
Обобщение и оценка результатов	Анализ и обработка полученных результатов	НР, И	НР – 50% И – 100%
	Оформление пояснительной записки к ВКР	НР, И	И – 100%
	Подготовка к защите ВКР	НР, И	НР – 30% И – 100%

### 3.2 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя НИР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой НИР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов (этапов работы).

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}; \quad (3.2.1)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{prob} + t_{max}}{6}. \quad (3.2.2)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{prob}$  – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Вторая формула дает более надежные оценки, но предполагает большую «нагрузку» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{РД}$ ) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} * K_{Д}, \quad (3.2.3)$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ ;

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_{Д} = 1-1,2$ ; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} * T_{К} \quad (3.2.4)$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (3.2.5)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );

$T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 52$ );

$T_{ПД}$  – праздничные дни ( $T_{ПД} = 10$ ).









$$T_k = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$



В таблице 3.2.1 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе.

Таблица 3.2.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Составление и утверждение технического задания	НР, И	3	5	3,8	4,56	0,46	5,52672	0,552672
Подбор и изучение материалов по теме	НР, И	15	20	17	2,04	20,40	2,47248	24,7248
Календарное планирование работ по теме	НР, И	2	4	2,8	3,36	1,68	4,07232	2,03616
Составление схемы эксперимента	НР, И	5	7	5,8	5,57	3,48	6,748416	4,21776
Экспериментальное исследование	НР, И	2	3	2,4	1,73	1,44	2,094336	1,74528
Анализ и обработка полученных результатов	НР, И	5	8	6,2	3,72	7,44	4,50864	9,01728
Оформление пояснительной записки к ВКР	НР, И	10	15	12	-	14,40	0	17,4528
Подготовка к защите ВКР	НР, И	5	6	5,4	1,9	6,48	2,356128	7,85376
<b>Итого:</b>				<b>55,4</b>	<b>22,92</b>	<b>55,78</b>	<b>27,77904</b>	<b>67,60051</b>

Таблица 3.2.2 – Линейный график работы

Этап	НР	И	Март			Апрель			Май		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	4,56	0,46									
2	2,04	20,40									
3	3,36	1,68									
4	5,57	3,48									
5	1,73	1,44									
6	3,72	7,44									
7	-	14,40									
8	1,9	6,48									

НР – ; И – 

### 3.3 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего ( $i$ -го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоемкость проекта;
- $TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоемкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;
- $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость  $i$ -го этапа проекта по его

завершении;

- $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе, здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя, в нашем примере  $m = 2$ .

Степень готовности определяется формулой (3.3.1)

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (3.3.1)$$

Применительно к таблице (3.2.1) величины  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) находятся в столбцах (6,  $j = 1$ ) и (7,  $j = 2$ ).  $TP_{\text{общ}}$  равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета  $TP_i$  (%) и  $CG_i$  (%) на основе этих данных содержится в таблице (3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Составление и утверждение технического задания	7,13	7,13
Подбор и изучение материалов по теме	31,91	39,04
Календарное планирование работ по теме	5,26	44,29

Этап	ТР <sub>i</sub> , %	СГ <sub>i</sub> , %
Составление схемы эксперимента	8,71	53,00
Экспериментальное исследование	2,70	55,71
Анализ и обработка полученных результатов	11,64	67,34
Оформление пояснительной записки к ВКР	22,52	89,86
Подготовка к защите ВКР	10,14	100,00

### **3.4 Расчет сметы на выполнение проекта**

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

#### **3.4.1 Расчет затрат на материалы**

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом



проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 3.4.1.1.

Таблица 3.4.1.1 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	250	1 уп.	250
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Контакт	20	2 шт.	40
Итого:			1840

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{мат}} = 1840 * 1,05 = 1932.$$

### 3.4.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, в его роли выступает исполнитель проекта, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого

этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083} \quad (3.4.2.1)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей недели.

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.4.2.1. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 3.2.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{\text{пр}} = 1,1$ ;  $K_{\text{доп.зп}} = 1,188$ ;  $K_{\text{р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{и}} = K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{доп.зп}} \cdot K_{\text{р}}; \quad (3.4.2.2)$$

$$K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699.$$

Таблица 3.4.2.1 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
НР	33664	1342,10	23	1,699	52445,41
И	15470	616,75	56	1,699	58680,29
Итого:					111125,70

### 3.4.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3; \quad (3.4.3.1)$$

$$C_{\text{соц}} = 111125,70 \cdot 0,3 = 33337,71.$$

### 3.4.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (3.4.4.1)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $C_{\text{э}} = 5,748$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 3.1.1.1 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (3.4.4.2)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , определяется исполнителем самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{об}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (3.4.4.3)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.4.4.1.

Таблица 3.4.4.1 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	160	0,5	459,84
Струйный принтер	2	0,1	1,1496
Лазер	42	1	241,416
Итого:			702,41

### 3.4.5 Расчет амортизационных расходов

В данной статье представлен расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (3.4.5.1)$$

где  $H_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2019 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне,  $F_{\text{Д}}$  равен:

$$F_{\text{Д}} = 298 \cdot 8 = 2384.$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для лазерной установки в 2019 г., при 7-ми часовом режиме и 18 рабочих днях,  $F_d$  равен:

$$F_d = 7 * 18 = 126.$$

$H_A$  определяется как величина обратная  $CA$ , в данном случае это:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Для лазера норма амортизации составляет 12,5%.

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать для ПК:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 160 \cdot 60000 \cdot 1}{2384} = 1268,46.$$

Для лазерной установки:

$$C_{AM} = \frac{0,125 \cdot 42 \cdot 200000 \cdot 1}{126} = 8333,33.$$

Итого суммарно:  $C_{AM} = 9601,79$ .

### 3.4.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛОБ} + C_{AM}) \cdot 0,1. \quad (3.4.6.1)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{ПРОЧ} = 0,1 \cdot (1932 + 111125,70 + 33337,71 + 702,41 + 9601,79) = 16799,12.$$

### 3.4.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Особенности формирования

изотопно-модифицированных частиц в плазме в условиях постоянного магнитного поля».

Таблица 3.4.7.1 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1932,00
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	111125,7
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{СОЦ}}$	33337,71
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	702,41
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	9601,79
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	16799,12
Итого:		184790,27

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 184790,27$  руб.

### 3.4.8 Расчет прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль  $G$  рассчитана как 20 % от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0.2 = 36958,05; \quad (3.4.8.1)$$

$$G = 184790,27 \cdot 0.2 = 36958,05.$$

### 3.4.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.4.9.1)$$

$$\text{НДС} = (184790,27 + 36958,05) \cdot 0,2 = 44349,06.$$

### 3.4.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.4.10.1)$$

$$C_{\text{НИР}} = 184790,27 + 36958,05 + 44349,06 = 266097,98.$$

## 3.5 Оценка экономической эффективности проекта

Этот проект научный, поэтому установить экономический эффект при вложении на данном этапе исследований невозможно.

## **Глава 4 Социальная ответственность**

В современных условиях труда для снижения возможностей получения травм и подверганию вредных воздействий используется повсеместная комплексная охрана труда.

Охрана труда – система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме [Статья 209 ТК РФ].

### **4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

При работе с используемым оборудованием пользователь подвергается различным угрозам. Перечень этих угроз приведён в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с муфельной печью	Химические токсические		ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества.
		Термическая опасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-94 ССБТ
		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
Работа с лазерной установкой и ПВЭМ	Воздействие излучения (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»  ГОСТ 12.1.040-83 «ССБТ. Лазерная безопасность. Общие требования»  СанПиН 5804-91

Производственными условиями труда – называется совокупность факторов производственной среды, оказывающих влияние на здоровье и работоспособность человека в процессе труда. Факторы классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

При работе с ПВЭМ на инженера воздействуют факторы:



— физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;

— психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

При работе с лазерной установкой на инженера воздействуют факторы:

— прямое излучение высокой частоты;

— рассеянное и отражённое излучение высокой частоты.

При работе с муфельной печью есть риск получения ожогов из-за высокой температуры.

## **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе с ПВЭМ и установкой.**

### **4.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья

устанавливается медицинским освидетельствованием.

#### 4.2.2 Организация рабочего места пользователя ПЭВМ

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. как показано на рис 4.2.2.1.

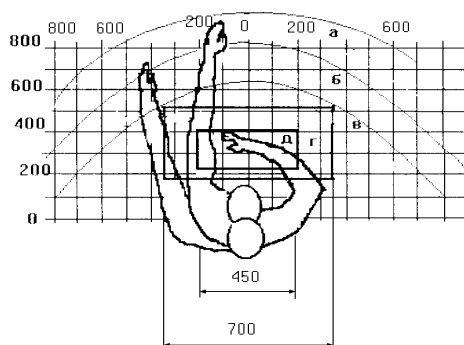


Рисунок 4.2.2.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация : в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного

нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### 4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с санитарно-гигиеническими нормами и приведены в таблице 4.2.3.1.

Таблица 4.2.3.1 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека - не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения

вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой – 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки ПВЭМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно санитарно-гигиеническим нормам напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2кГц – 250 нТл;

— в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Поскольку у ПК ЖК дисплей, то излучения от него не идёт. Следовательно основная доза ЭМП идёт только от системного блока и кабелей.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

— увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

— применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты (нет необходимости для ЖК дисплея).

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### **4.2.4 Правила эксплуатации лазера**

Лазерное излучение – это вынужденное (посредством лазера) испускание атомами вещества порций-квантов электромагнитного излучения. Лазерная установка включает активную (лазерную) среду с оптическим резонатором, источник энергии ее возбуждения и, как правило, систему охлаждения.

Лазерное излучение характеризуется исключительно высоким уровнем концентрации энергии: плотность энергии —  $10^{10}$ – $10^{12}$  Дж/см<sup>3</sup>; плотность мощности —  $10^{20}$ – $10^{22}$  Вт/см<sup>3</sup>. По виду излучения оно разделяется на прямое (заклученное в ограниченном телесном угле); рассеянное (рассеянное от вещества, находящегося в составе среды, сквозь которую проходит лазерный луч); зеркально отраженное (отраженное от поверхности под углом, равным углу падения луча); на диффузно отраженное (отражается от поверхности по всевозможным направлениям).

В процессе эксплуатации лазерных установок персонал может подвергнуться воздействию большой группы физических и химических факторов опасного и вредного воздействия. Наиболее характерными являются следующие факторы: а) лазерное излучение (прямое, рассеянное или отраженное); б) ультрафиолетовое излучение, источником которого являются импульсивные лампы накачки или кварцевые газоразрядные трубки; в) яркость света, излучаемого импульсивными лампами или материалом мишени под воздействием лазерного излучения; г) электромагнитные излучения диапазона ВЧ и СВЧ; д) инфракрасное излучение; ж) температура поверхностей оборудования; з) электрический ток цепей управления и источника питания; и) шум и вибрации; к) разрушение систем накачки лазера в результате взрыва; л) запыленность и загазованность воздуха, происходящие в результате воздействия лазерного излучения на мишень и радиолиза воздуха (выделяются озон, окислы азота и другие газы).

В зависимости от потенциальной опасности обслуживания лазерных установок они подразделены на четыре класса. Чем выше класс установки, тем выше опасность воздействия излучения на персонал и тем большее число факторов опасного и вредного воздействия проявляется одновременно.

Если для 1-го класса опасности лазерной установки обычно характерна лишь опасность воздействия электрического поля, то для 2-го класса характерна еще и опасность прямого и зеркального отраженного излучения; для 3-го класса — еще и опасность диффузного отражения, ультрафиолетового и инфракрасного излучения, яркости света, высокой температуры, шума, вибраций, запыленности и загазованности воздуха рабочей зоны.

Лазерная установка 4-го класса опасности характеризуется полным наличием потенциальных опасностей, перечисленных выше.

Лазерное излучение, в зависимости от класса лазера может вызывать различные повреждения тканей тела человека.

Наиболее подвержен поражению лазерным излучением глаз человека. Сфокусированный на сетчатке хрусталиком глаза лазерный луч будет иметь вид малого пятна с еще более плотной концентрацией энергии, чем падающее на глаз излучение. Поэтому попадание лазерного излучения в глаз опасно и может вызвать повреждение сетчатой и сосудистой оболочек с нарушением зрения. При малых плотностях энергии происходит кровоизлияние, а при больших - ожог, разрыв сетчатой оболочки, появление пузырьков газа в стекловидном теле.

Лазерное излучение может вызвать также повреждение кожи и внутренних органов человека. Повреждение кожи лазерным излучением схоже с термическим ожогом. На степень повреждения влияют как входные характеристики лазеров, так и цвет, и степень пигментации кожи. Интенсивность излучения, которая вызывает повреждение кожи, намного выше интенсивности, приводящей к повреждению глаза.

При работе с лазерной установкой необходимо соблюдать технику безопасности.

- инженеры должны носить специальные защитные очки для защиты от отражённого и рассеянного излучения;

- температура окружающей среды должна быть в пределах 10-35°C. При температуре ниже указанной, возможен быстрый износ механических частей оборудования. При температуре выше, элементы станка (лазерная трубка в частности), будут нагреваться, что приведет к поломке.

- влажность в помещении должна быть менее 80%. При более высокой влажности на оборудовании образуется конденсат, который может навредить электронному устройству.

- помещение, в котором устанавливается оборудование, должно быть хорошо вентилируемое.

- избегать резких скачков напряжения. Следить за уровнем: при



высоком уровне напряжения электропитание оборудования выйдет из строя.

Лазерное излучение незаметно невооруженным взглядом, поэтому работа с оборудованием требует следующих мер:

- запрещается оставлять станок включенным без присмотра рабочего персонала – это может привести к пожару;
- запрещается направлять излучатель на живых существ даже в случае, если он обесточен;
- запрещается использовать станок при открытом доступе к электронике, излучателю, линзам;
- запрещается работать во взрывоопасной среде, рядом с легковоспламеняющимися предметами.

#### **4.2.5 Правила безопасности при работе с муфельной печью**

В эксперименте использовалась электрическая муфельная печь. При работе с муфельной электропечью возможно воздействие на работающих следующих опасных и вредных производственных факторов:

- ожоги тела и глаз расплавленным металлом или шлаком;
- отравление токсичными газами при отсутствии вентиляции;

Существует 4 степени ожога в зависимости от их тяжести:

- I степень: боль, покраснение кожи, отёк.
- II степень: появились волдыри.
- III степень: волдыри лопнули, на месте ожога — открытая рана.
- IV степень: обугливание, потеря чувствительности.

Корпус печи при работе разогревается достаточно чтобы получить ожоги 1 и 2 степени. В активной зоне температура достигает 800°C поэтому при попадании какой-либо части тела внутрь (например пальца) можно получить ожог 4 степени.

Общие требования безопасности при работе с муфельной печью:

- не допускать повреждения кабеля электропитания и контакта его с нагретыми частями оборудования;
- не прикасаться к нагретым частям оборудования во время его работы;
- соблюдать осторожность при работе с нагретыми изделиями;
- не допускать попадания любых предметов и жидкостей внутрь корпуса оборудования, это может привести к поломке или несчастному случаю.
- в случае попадания на поверхность и внутрь оборудования опасных, химически активных и агрессивных материалов, а также материалов, которые могут стать таковыми под воздействием повышенной температуры, необходимо, по окончании работы с такими материалами принять соответствующие меры по нейтрализации возможных вредных последствий.

#### **4.3 Электробезопасность**

Опасность поражения электрическим током отличается тем, что она является скрытой, т.е. человек не в состоянии обнаружить органами чувств наличие напряжения. Воздействие электрического тока способно вызвать различные формы нарушения жизнедеятельности, которые могут быть связаны с электротравмами и электрическим ударом.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Также использовался блок питания постоянного тока, подключенный к индукционной печи, и лазерная установка. Причиной удара током может служить замыкание на корпусе системного блока, лазерной установки, незаизолированные контакты подключения печи к блоку питания.

Безопасность электроустановок обеспечивается следующими мерами защиты:

- надежной изоляцией;
- недоступностью токоведущих частей;
- защитным заземлением;
- защитным занулением;
- выравниванием потенциалов;
- автоматическим отключением;
- предупредительной сигнализацией, надписями и плакатами.

#### **4.4 Пожарная и взрывная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Помещение лаборатории относится к категории В.

Причинами возгорания могут служить:

- короткое замыкание;
- попадание горючего вещества в зону воздействия лазерного излучения; высокая температура в рабочей зоне печи;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Можно выделить ряд мероприятий по защите:

- разработку и реализацию норм и правил пожарной безопасности, инструкций о порядке;
- обращения с пожароопасными веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и действиях людей при возникновении пожара;
- изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности;

— порядок хранения веществ и материалов, тушение которых недопустимо одними и теми же средствами, в зависимости от их физико-химических и пожароопасных свойств;

— нормирование численности людей на объекте по условиям безопасности их при пожаре;

— разработку мероприятий по действиям администрации, рабочих, служащих и населения на случай возникновения пожара и организацию эвакуации людей;

— обеспечение вентиляции (если присутствуют газообразные вещества, которые могут воспламениться);

Как базовое средство пожаротушения используются огнетушители. Для каждого вида пожаров – свой. Гражданские огнетушители свободно доступные в продаже предназначенные для тушения пожаров разных классов:

— А: при горении твердых веществ;

— В: при горении жидких веществ;

— С: при горении газообразных веществ;

— Е: при горении электрооборудования под напряжением до 1000 В.

Виды огнетушителей:

— жидкостные: используются только при плюсовых температурах. Предназначены для тушения горящих твердых веществ (класс пожара А, В);

— порошковые: наиболее универсальны. Используются во всех типах пожаров (класс пожара А, В, С, Е);

— углекислотные: при тушении пожаров в помещении, где нежелательно использовать воду (класс пожара В, С);

— аэрозольные: хорошо тушат твердые вещества, электрические установки под напряжением. Исключение – щелочи и вещества содержащие кислород (класс пожара В, С, Е);

— воздушно-пенные: предназначенные для тушения средних пожаров. Не рекомендуется использовать при тушении веществ поддерживающих горение без кислорода (класс пожара А, В, С).

## **Заключение**

Создана феноменологическая модель процесса нуклеации в газовой фазе, подтверждающая спиновую природу наблюдаемых явлений.

Проанализированы порошки, полученные в магнитных полях различной величины. Показано что с увеличением внешнего магнитного поля увеличивается доля наночастиц в порошке.

Изотопный состав полученных дисперсных частиц требует дальнейшего изучения.

В будущем возможно улучшение процесса улавливания образующихся частиц при помощи электростатической ловушки. Это позволит улавливать дисперсные наночастицы и проанализировать процесс нуклеации более точно.

### **Список использованных источников**

- 1) Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма. УФН т. 174, №5, 2004, с. 495-514.
- 2) Бороненко М.П., Гуляев И.П., Серегин А.Е. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе. Вестник ЮГУ, т. 2(25), 2014, с. 7-15.
- 3) Смирнов Б.М. Процессы в плазме и газах с участием кластеров. УФН т. 167, №11, с. 1169-1199.
- 4) Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. – М.: Наука, 1974. – 307 с.
- 5) Афанасьев Ю. В. и др., Взаимодействие мощного лазерного излучения с плазмой, в кн.: Итоги науки и техники. Радиотехника, т. 17, 1978.
- 6) Райзер Ю. П. Пробой и нагревание газов под действием лазерного луча. УФН, т. 87, 1965, с. 29–64.
- 7) Зельдович Я.Б., Бучаченко А. Л., Франкевич Е. Л. Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике, УФН, т. 155, 1998.
- 8) Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М.: Химия, 1970.
- 9) Кузнецов В.И. Общая химия: Тенденция развития: [Науч.- попул.]. – М.: Высш. шк., 1989. – 288 с.: ил.
- 10) Салихов К.М., 10 лекций по спиновой химии. – Казань: УНИПРЕСС, 2000. – 152 с.
- 11) Рыбин Е.Н., Валухов В.П., Купцов В.Д. Термодинамика пересыщенного пара на молекулярных ядрах конденсации. Журнал технической физики, т. 82(8), 2012.
- 12) Анисимов М.П. Нуклеация: теория и эксперимент. Успехи химии, т. 72 (7), 2003.
- 13) Лушников А.А., Сутугин А.Г. Современное состояние теории гомогенной нуклеации. Успехи химии т. 45 (3), 1976.

- 14) ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Текст]. Взамен ГОСТ 12536-79; введ. 01.07.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 17 с.
- 15) Froyd, K. D., & Lovejoy, E. R. Experimental Thermodynamics of Cluster Ions Composed of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O. 1. Positive Ions. The Journal of Physical Chemistry A, 107(46), 2003, 9800–9811.
- 16) Anisimov, M. P. Nucleation: theory and experiment. Russian Chemical Reviews, 72(7), 2003, 591–628.
- 17) Павлов В. А., Скрипов В. П. // ТВТ. – 1976. – 8. – С. 579-585.
- 18) Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. – М.: Химия, 1972. – 304 с.
- 19) Горелик А.Г., Амитин А.В. Десублимация в химической промышленности. - М.: Химия, 1986. - 272 с.
- 20) A.P. French, Edward F. Teylor An introduction to quantum physics. - Sunbury-on-Thames : Nelson, 1979.
- 21) Конотопский В.Ю. Методические указания к выполнению раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение» магистерской диссертации для всех специальностей ИК. – Изд-во: ТПУ, 2014. – 23 с.
- 22) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; Введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
- 23) ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
- 24) ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [Текст]. – Введ. 1977. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.



- 25) ГОСТ 12.1.004-94 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [Текст]. – Введ. 1992. – М.: Стандартиформ, 2006. – 48 с.
- 26) ГОСТ 12.1.0.040-83 ССБТ Лазерная безопасность. Общие требования [Текст]. – Введ. 1984. – М.: Издательство стандартов, 2006. – 48 с.
- 27) СанПиН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров [Текст]. – М.: 1992.